

HIDROGEOLOGÍA DE LA ISLA DE SANTIAGO (CABO VERDE)

HIDROGEOLOGY OF SANTIAGO ISLAND (CABO VERDE)

MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

Presentado por:

JÚLIA MENDO CULLELL

Dirigido por:

DRA. MARIA DEL CARMEN CABRERA SANTANA

Alcalá de Henares, a 15 de septiembre de 2020

ÍNDICE

RESUMEN.....	3
1. INTRODUCCIÓN	4
2. ZONA DE ESTUDIO	5
2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL	5
GEOGRAFÍA Y LOCALIZACIÓN	5
CLIMA	7
POBLACIÓN	10
RECURSOS HÍDRICOS.....	11
USOS DEL AGUA, ESTADO DEL ABASTECIMIENTO Y ALCANTARILLADO	13
LEGISLACIÓN (AGUAS CABO VERDE).....	16
2.2. GEOLOGÍA.....	17
3. HIDROGEOLOGÍA	23
3.1. INVENTARIOS DE PUNTO DE AGUA, ORIGEN DE LOS DATOS	26
3.2. PIEZOMETRÍA.....	27
3.3 IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA Y DESCARGA	29
3.4. HIDROGEOQUÍMICA.....	30
4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	45
5. BIBLIOGRAFÍA	47

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Mapa con la localización de Cabo Verde en el mundo.</i>	5
<i>Figura 2: Mapa del archipiélago con las diferentes islas.</i>	6
<i>Figura 3: Mapa de la Isla de Santiago.</i>	7
<i>Figura 4: mapa de la Isla de Santiago con las precipitaciones medias anuales representadas (Proença de Oliveira et al., 2017).</i>	9
<i>Figura 5: División administrativa de la Isla de Santiago .Fuente: Ministério de Infraestruturas e Transportes (marzo 2020).</i>	10
<i>Figura 6: red hidrográfica de Santiago (Proença de Oliveira et al., 2017).</i>	12
<i>Figura 7: mapa de la Isla de Santiago con todas las intervenciones previstas por el proyecto PDSAAIS.</i>	15
<i>Figura 8: Mapa geológico de la Isla de Santiago (Lobo de Pina, 2009).</i>	18
<i>Figura 9: Corte geológico de la Isla de Santiago, dirección NO-SE (Lobo de Pina, 2009).</i>	20
<i>Figura 10: Corte geológico de la Isla de Santiago, dirección NE-SO (Lobo de Pina, 2009).</i>	21
<i>Figura 11: Corte geológico de la Isla de Santiago, dirección NE-SO (Lobo de Pina, 2009).</i>	22
<i>Figura 12: Esquema hidrogeológico general de la isla de Santiago (da Mota Gomes, 2007).</i>	24
<i>Figura 13: Red piezométrica de la Isla de Santiago (Proença de Oliveira et al., 2017).</i>	27
<i>Figura 14: mapa piezométrico de la Isla de Santiago, 2008 (Lobo de Pina, 2009).</i>	28
<i>Figura 15: mapa de manantiales la Isla de Santiago (Lobo de Pina, 2009).</i>	29
<i>Figura 16: modelo hidrogeológico conceptual de la Isla de Santiago (Lobo de Pina, 2009).</i>	30
<i>Figura 17: mapa de temperaturas de las aguas subterráneas de la Isla de Santiago (Lobo de Pina, 2009).</i>	32
<i>Figura 18: mapa de pH de las aguas subterráneas de la Isla de Santiago (Lobo de Pina, 2009).</i>	33
<i>Figura 19: mapa de la conductividad eléctrica de las aguas subterráneas de la Isla de Santiago (Lobo de Pina, 2009).</i>	34
<i>Figura 20: Mapa de la Isla de Santiago con las concentraciones sodio (Lobo de Pina, 2009).</i>	36
<i>Figura 21: Mapa de la Isla de Santiago con las concentraciones magnesio (Lobo de Pina, 2009).</i>	37
<i>Figura 22: Mapa de la Isla de Santiago con las concentraciones calcio (Lobo de Pina, 2009).</i>	38
<i>Figura 23: Diagramas de álcali-sílice total en las tres unidades geológicas de la Isla de Santiago (Lobo de Pina, 2009).</i>	38
<i>Figura 24: Mapa de la Isla de Santiago con las concentraciones de potasio (Lobo de Pina, 2009).</i>	40
<i>Figura 25: Mapa de la Isla de Santiago con las concentraciones de cloruro (Lobo de Pina, 2009).</i>	41
<i>Figura 26: Mapa de la Isla de Santiago con las concentraciones de bicarbonato (Lobo de Pina, 2009).</i>	42
<i>Figura 27: Mapa de la Isla de Santiago con las concentraciones de sulfato (Lobo de Pina, 2009).</i>	43
<i>Figura 28: Mapa de la Isla de Santiago con las concentraciones de nitrato (Lobo de Pina, 2009).</i>	44

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Características físicas de las islas habitadas de Cabo Verde. Datos: Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica – Delegação da Praia. Elaboración propia.</i>	8
<i>Tabla 2: distribución de la población de la Isla de Santiago por municipios y sexos. Los datos proceden del Censo General de Población y Vivienda del Instituto Nacional de Estadísticas (2010):</i>	11
<i>Tabla 3: Recursos hídricos por islas en Cabo Verde. Datos: Schéma Directeur pour la mise en valeur des ressources en eau (1993 – 2005). Elaboración propia.</i>	11
<i>Tabla 4: Características de las unidades hidrogeológicas de la isla de Santiago (Pina, 2009).</i>	25

RESUMEN

Cabo Verde es un archipiélago que se encuentra en la costa oeste del Océano Atlántico a unos 500 km de la costa africana. La isla de Santiago forma parte de éste archipiélago. Tiene un clima semiárido (con un valor de precipitación entre 200 y 500 mm/año), una población de 272.302 habitantes (2010) y unos recursos hídricos limitados a causa del corto período de lluvias.

La isla de Santiago está formada por 3 unidades hidrogeológicas con distintas características y funciones entre ellas. Éstas son la unidad base (en la base y con un alto grado de impermeabilidad), la unidad intermedia (coeficiente de almacenamiento muy alto) y la unidad reciente (formada por conos altamente porosos y permeables).

Para conocer la hidrología subterránea, en Santiago encontramos un inventario de puntos de agua que consta de 1.074 pozos, 1.119 manantiales y 780 piezómetros. Gracias a este inventario, se sabe que el flujo de agua sigue la topografía (de las zonas más altas a las más bajas) y que en algunos puntos hay una inversión del flujo natural, cosa que significa que hay una extracción superior a la capacidad del acuífero y por lo tanto una intrusión salina.

A través de éste estudio también se puede ver que el gradiente de temperaturas en aguas subterráneas es insignificante, que las variaciones mayores de pH se ven sobretodo en puntos donde la explotación es mayor y que la conductividad también se ve afectada por ésta extracción. Los cationes presentes en las aguas de la Isla de Santiago (S, Mg, Ca, Si y Na) se originan a partir de procesos naturales, pero se distribuyen en función de la afectación de la intrusión salina y la actividad humana. Los aniones en cambio no tienen un origen mayoritariamente natural, sino que es más antrópico.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente hay una explotación de recursos naturales intensa a nivel mundial. Esto resulta en impactos negativos hacia el medio ambiente y condiciona el desarrollo sostenible de una región o país. Estos recursos, como el agua, son básicos para incrementar la productividad agrícola y el desarrollo industrial, como también para satisfacer la salud, higiene y nutrición de la población. En países africanos, los recursos hídricos escasos suelen estar relacionados con la ubicación geográfica, la temperatura y precipitación de la zona, y las características hidrográficas (Lobo de Pina, 2009).

En la Isla de Santiago de Cabo Verde está habiendo un aumento de población constante. Además, se prevé que para 2021 se supere el millón de turistas, con unos recursos hídricos limitados y que deben ser gestionados correctamente (Santamarta et al., 2017).

El objetivo general de este estudio es realizar la caracterización del funcionamiento hidrogeológico del acuífero de la isla. Para ello, se han desarrollado dos objetivos específicos:

- Realizar una descripción general de la isla en todos los aspectos que afecten a su hidrología e hidrogeología.
- Sintetizar y detallar la información hidrogeológica existente para comprender el funcionamiento hidrogeológico de la isla.

2. ZONA DE ESTUDIO

2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

GEOGRAFÍA Y LOCALIZACIÓN

El archipiélago de Cabo Verde se encuentra situado en la costa Oeste del Océano Atlántico (Figura 1), a unos 500 km de la costa africana, limitado por los paralelos 17° 13' y 14° 48' N, y por los meridianos 22° 42' y 25° 22' O. Forma parte de una región biogeográfica que se denomina Macaronesia introducida por el botánico P. Barker-Webb en el siglo XIX y que está formada por los archipiélagos de Azores, Madeira, Canarias, Salvajes y Cabo Verde (Losada Lima, 1987).



Figura 1: Mapa con la localización de Cabo Verde en el mundo.

Las islas de Cabo Verde surgieron de los fondos oceánicos con alrededor de 3.000 m de profundidad. Los fondos oceánicos sobre los que se asientan las islas datan de 125-150 millones de años, pero las islas en sí tienen un rango de edad de 8 millones de años al oeste, y 20 millones de años al este (Pim, Peirce, Watts, Grevemeyer, & Krabbenhoeft, 2008). El levantamiento de Cabo Verde se produjo a principios del Mioceno, hace unos 22 millones de años a través de puntos calientes. Los puntos calientes son áreas de actividad volcánica

generadas por plumas que ascienden desde la capa límite en la base del manto. El inicio de las islas orientales (Sal, Boavista y Maio) se produjo en el Mioceno medio (hace 15 millones de años). El volcán que produjo las islas del noroeste (Santo Antão, Sao Vicente y Sao Nicolau) y suroeste (Brava, Fogo y Santiago) es más joven y data de hace 6 millones de años (Vinnik et al., 2012).

El Archipiélago (Figura 2) se divide en tres partes. La norte, con las islas de Santo Antão, San Vicente, Santa Luzia y San Nicolau, la sur-este, islas de Sal, Boa Vista, Maio y Santiago, y la oeste, islas de Fogo y Brava (Bebiano, 1932). El archipiélago tiene diez islas principales, nueve de las cuales están habitadas, que van desde 35 km² (Ilha Santa Luzia, deshabitada) hasta 991 km² (Ilha de Santiago), y trece islotes deshabitados, totalizando una superficie de 4.033 km² (figura 2) (Macdonald, 1992).

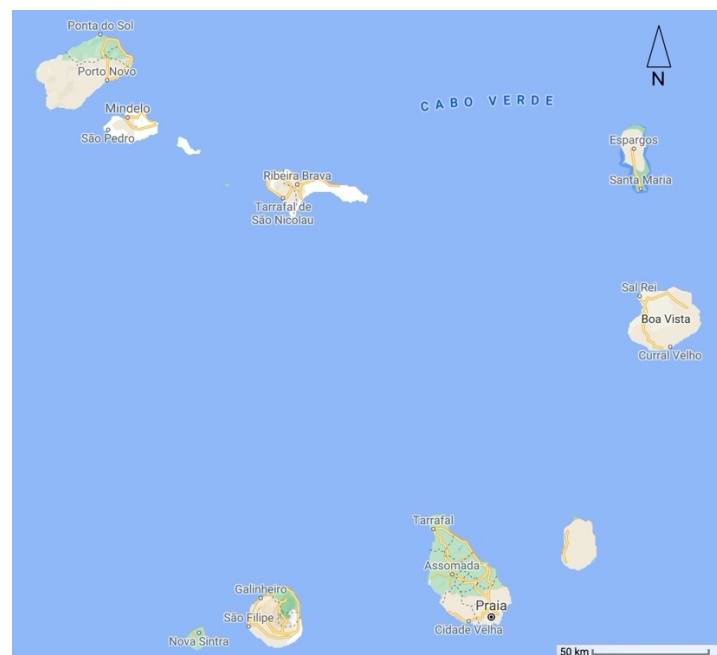


Figura 2: Mapa del archipiélago con las diferentes islas.

La isla de Santiago está situada en la parte sur del archipiélago, entre los paralelos 15° 20' y 14° 50' N y los meridianos 23° 50' y 23° 20' O del meridiano de Greenwich (figura 3).



Figura 3: Mapa de la Isla de Santiago.

Tiene una longitud máxima de 54,29 km entre la punta de Janela (oeste) y la punta de Praia Baixo (este). Su altitud máxima es de 1392 m y tiene una superficie de 991 km² (Serralheiro, 1976). Ésta isla representa el 30% del área total del archipiélago (Aly de Pina, 2011).

Santiago está formada por rocas volcánicas prácticamente en su totalidad. Tiene un espesor pequeño de suelo y una pequeña cobertura de vegetación, eso hace que el ecosistema sea frágil y con un potencial productivo reducido. También destaca una disponibilidad reducida de agua superficial causada por la escasez e irregularidad de precipitaciones, cosa que hace que haya una gran dependencia de los habitantes de las aguas subterráneas (Aly de Pina, 2011).

CLIMA

El clima de Cabo Verde es más suave que en el continente africano gracias al poder regulador del océano. Por lo tanto, en sitios más cercanos al mar, las temperaturas son más suaves y moderadas, pero hacia el interior de las islas puede llegar a ser muy caluroso, con noches un poco más frescas en la época seca. En la mayoría de áreas, la vegetación es escasa, cosa que hace que haya muy poca protección al sol y sombras (Peace Corps, 2009). Un suelo pobre y

la escasez de precipitaciones hacen que durante los largos periodos secos, las cosechas, el ganado y la población dispongan de una cantidad de agua limitada.

Cabo Verde forma parte del cinturón árido del Sahel y contiene por lo tanto los factores más representativos de este tipo de clima: irregularidad de precipitaciones de un año al otro, períodos de sequía repetidos y violencia de ciertas tormentas, de corta duración pero que pueden destrozar las infraestructuras (Macdonald, 1992).

Hay dos estaciones principales que definen el clima de las islas de Cabo Verde: el “tiempo de brisa” (estación seca), que va de diciembre a junio, y el “tiempo de agua” (estación lluviosa), de agosto a octubre. La lluvia entonces, es el elemento que crea la diferenciación estacional anual, y es el eje al cual gira la vida en Cabo Verde (da Mota Gomes, 2007).

Las islas de Sal y Boa Vista son las que están situadas más al norte del archipiélago y son las que tienen una precipitación menor. Las condiciones que presentan el resto de islas son de carácter intermedio. Las características físicas de las islas habitadas de Cabo Verde son las que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Características físicas de las islas habitadas de Cabo Verde. Datos: Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica – Delegação da Praia. Elaboración propia.

Isla	Superficie (km ²)		Altitud (m)	Precipitaciones (mm/año)	Tierra arable (ha)	
Boa vista	628	15%	387	57,06	500	1%
Brava	63	2%	976	201,2	1060	3%
Fogo	470	12%	2829	475,4	5900	14%
Maio	275	7%	437	139	660	2%
Sal	221	5%	406	46,9	220	1%
San Nicolau	347	9%	1312	199,4	2000	5%
San Vicente	230	6%	750	82,79	450	1%
Santiago	1007	25%	1394	297,5	21500	52%
Santo Antão	785	19%	1979	367,6	8800	21%
Cabo verde	4033	100%		230	41090	100%

Teniendo en cuenta los valores medios anuales de precipitación, se pueden distinguir tres climas dentro de Cabo Verde:

- Santo Antão, Fogo, Santiago y Brava → Semiárido, con un valor de precipitación entre 200 y 500 mm/año.
- São Vicente, São Nicolau y Maio → Árido, con un valor de precipitación entre 100 y 200 mm/año.
- Sal y Boa Vista → Extremadamente Árido, con un valor inferior a 100 mm/año.

La figura 4 muestra la precipitación anual en la Isla de Santiago.

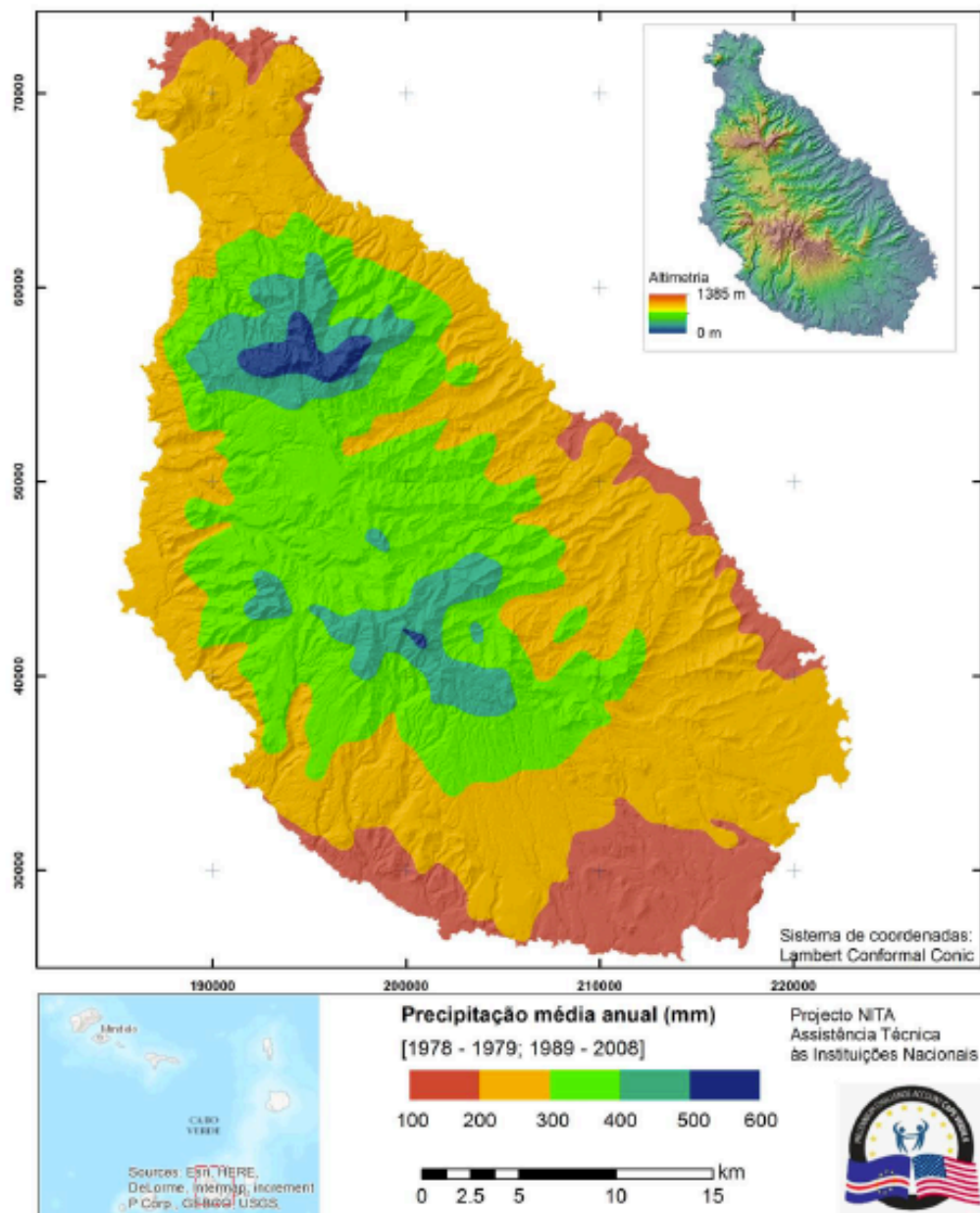


Figura 4: mapa de la Isla de Santiago con las precipitaciones medias anuales representadas (Proença de Oliveira et al., 2017).

- Climas costeros, como Praia y San Francisco.
- Climas de altitud, como los de Pico da Antónia y Serra Malagueta.
- Climas de pendiente no expuestos a vientos alisios: Mosquito da Horta y Chuva Chove.
- Microclimas puntuales, dentro de ciertos valles (Seca, Principal, Engenhos, etc.)

La isla de Santiago consta de una población de 272.302 habitantes, 142.143 de sexo femenino y 130.159 de sexo masculino, según el Censo General de Población y Vivienda del Instituto Nacional de Estadísticas del año 2010. Administrativamente, la isla consta de nueve municipios y once parroquias (Figura 5 y Tabla 2).

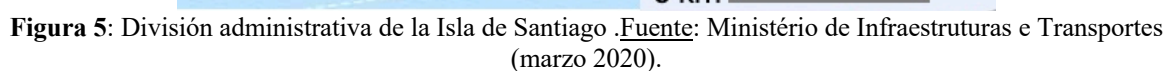


Tabla 2: distribución de la población de la Isla de Santiago por municipios y sexos. Los datos proceden del Censo General de Población y Vivienda del Instituto Nacional de Estadísticas (2010):

Municipio	Área (km ²)	Habitantes	Parroquia
Praia	97	66.804 SF 63.467 SM 130.271	Nossa Senhora da Graça (741)
São Domingos	134,5	7.054 SF 6.645 SM 13.699	São Nicolau Tolentino (752) N.ª Senhora da Luz (751)
Santa Catarina	214,2	22976 SF 20.264 SM 43.240	Santa Catarina (721)
Santa Cruz	109,8	13.754 SF 12.831 SM 26.585	Santiago Maio (731)
Tarrafal	112,4	10.162 SF 8.399 SM 18.561	Santo Amaro Abade (711)
São Miguel	91	8.609 SF 7.021 SM 15.630	S. Miguel Arcanjo (761)
S. Lourenço dos dos Órgãos	38,5	3.803 SF 3.547 SM 7.350	S. Lourenço dos Órgãos (781)
S. Salvador do Mundo	28,7	4.608 SF 4.035 SM 8.643	S. Salvador do Mundo (771)
Ribeira Grande de Santiago	164,2	4.373 SF 3.950 SM 8.323	Santíssimo Nome de Jesus (791) S. João Baptista (792)

RECURSOS HÍDRICOS

El archipiélago de Cabo Verde sufre un clima caracterizado por un corto periodo de lluvias, largos periodos de sequía, falta de recursos hídricos permanentes y, por lo tanto, escasez de agua. La única isla que posee una cierta cantidad de agua como recurso natural es de Santo Antão, que tiene algunos arroyos permanentes (da Mota Gomes & Lobo de Pina, 2003). Se ver la información referente a recursos hídricos por isla, con énfasis en la isla de Santiago, en la tabla 3.

Tabla 3: Recursos hídricos por islas en Cabo Verde. Datos: Schéma Directeur pour la mise en valeur des ressources en eau (1993 – 2005). Elaboración propia.

Ilha	Precipitación (mm)	Agua Superficial	Agua Subterranea (hm ³ /año)		
			Bruto	Exportable (período medio)	Exportable (período seco)
Boa Vista	42	2,5	1,6	0,7	0,3
Brava	17	2,3	1,9	1,6	1

Fogo	233	79	42	12	9,3
Maio	41	4,7	2,1	0,9	0,5
S. Nicolau	49	5,9	4,2	2,5	1,5
S. Vicente	21	2,3	0,6	0,4	0,2
Sal	13	0,7	0,4	0,1	0,05
Santiago	323	56,6	42,4	26	16,5
Santo Antão	186	27	28,6	21,3	14,5
Cabo Verde	925	181	124	65	44

En Cabo Verde, la escorrentía es generalmente torrencial, lo que condiciona la explotación de este recurso. Es escasa la captura del agua de escorrentía, aunque sí se almacena, ya que es relativamente importante en Santiago. El macizo del Pico da Antónia es la zona de drenaje más importante, ya que se trata de la red de valles más densa hacia el este. Lo mismo pasa en la Serra da Malagueta (da Mota Gomes & Lobo de Pina, 2003). Se puede ver la red hidrográfica de la Isla de Santiago en la figura 6.



Figura 6: red hidrográfica de Santiago (Proença de Oliveira et al., 2017).

Toda el agua utilizada, a excepción del agua desalada, tiene su origen en la lluvia. Así, los recursos hídricos subterráneos y superficiales son alimentados por las precipitaciones.

Lamentablemente, las precipitaciones en Cabo Verde han sido bastante irregulares durante decenas de años, con el agravante de que una buena parte se pierde en el mar.

Si que hay una explotación del acuífero de la isla de Santiago que sirve para abastecer mayoritariamente los municipios más rurales de la isla, aunque es un recurso muy escaso y delicado ya que si la explotación es extrema, pueden aparecer muchos problemas de contaminación. También hay el Embalse de Poilão que tiene una capacidad es de 1.7 hm³.

Otra forma de conseguir agua es a través de recursos hídricos industriales. A día de hoy, en la Isla de Santiago se produce agua desalada a partir del agua de mar. Hay distintas empresas que operan en el sector de suministro y/o encargadas de gestionar el recurso, como ELECTRA, APP (Aguas de Ponta Preta), APN (Aguas de Porto Novo), AEB (Água e Energía da Boavista) i SAAS (Serviço Autónomo de Água e Saneamento de la Câmara Municipal de Maio) (Martel et al., 2011).

USOS DEL AGUA, ESTADO DEL ABASTECIMIENTO Y ALCANTARILLADO

Ha habido una creciente expansión demográfica en las últimas décadas, principalmente alrededor de Praia, que ha aumentado la presión sobre los recursos hídricos en la Isla de Santiago. El principal recurso de agua dulce es el agua subterránea, unos 40 hm³/año. También se usa el agua almacenada por presas o desalinizada, en menor medida pero cada vez más presente en las ciudades más grandes. Es necesario, pero, invertir más en la investigación de los recursos hídricos subterráneos de Cabo Verde ya que no se conocen completamente.

Con respecto a la distribución de aguas, esta no llega a toda la población, aunque en las ciudades llega a más del 65% de la población (porcentaje inferior en el ámbito rural). Es un reto, por tanto, que el abastecimiento y saneamiento llegue a todos los ciudadanos de las Islas.

Las precipitaciones tienen que asegurar el abastecimiento a unos 500.000 habitantes, a unos 400.000 turistas y a una actividad agrícola que rondan las 45.000 hectáreas (el 90% con cultivos de secano y un 10% de regadío). La eficiencia en el uso del agua de riego es reducida

y es un aspecto a mejorar en el futuro del sector. También hay mucha presencia de actividad ganadera (Santamarta et al., 2017).

Entre las medidas propuestas para la mejora del uso eficiente del agua en la agricultura, se encuentra la introducción de técnicas que optimizan los riegos, como el goteo. La reutilización de las aguas depuradas no está contemplada por el momento.

El Proyecto de Desarrollo del Sistema de Abastecimiento de Agua en la Isla de Santiago (PDSA AIS) (<http://anas.gov.cv/pdssais/pdsaais-vai-melhorar-a-capacidade-de-producao-e-distribuicao-de-agua-em-santiago/>), que se inició en enero de 2019, permitirá mejorar la capacidad de producción y distribución de agua en la isla de Santiago, gracias a la instalación de dos unidades desaladoras por ósmosis inversa con una capacidad de producción de 20.000 m³ y 15.000 m³ / día de agua potable.

La producción de estas unidades se distribuirá al resto de municipios de norte a sur de la isla, tal y como se muestra en la figura 7, a través de varios grandes embalses en todos los municipios de la isla de Santiago (Agência Nacional de Água e Saneamento, 2018).

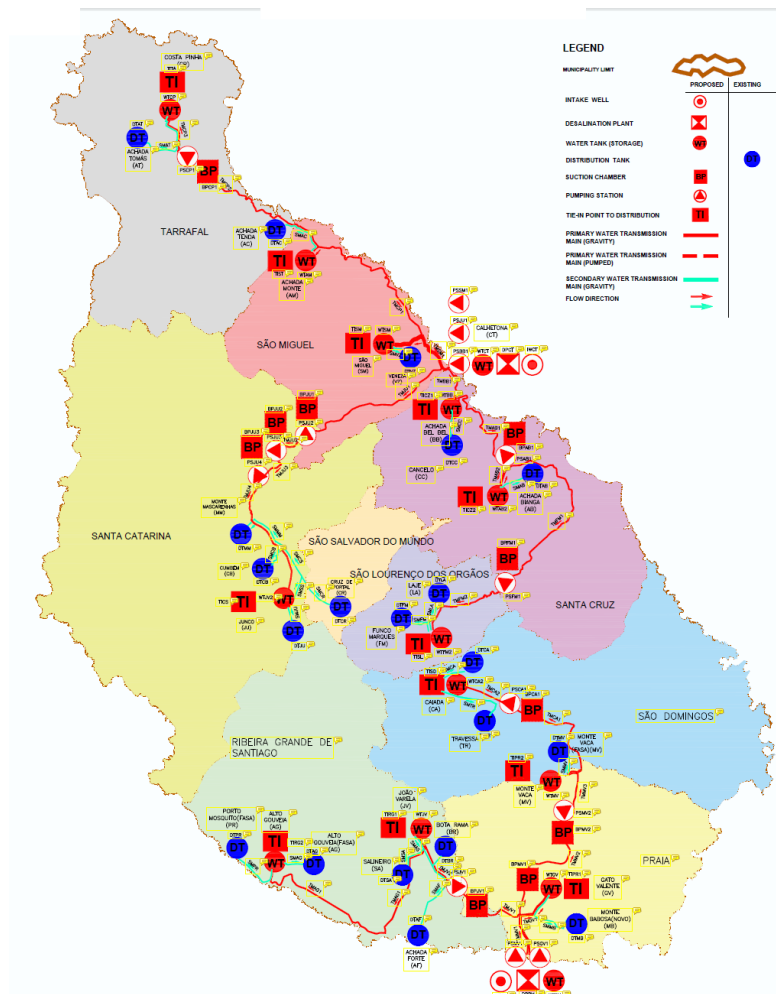


Figura 7: mapa de la Isla de Santiago con todas las intervenciones previstas por el proyecto PDSAAIS.

También hay el proyecto ADAPTaRES, el cual incluye una serie de actuaciones encaminadas a la adaptación al cambio climático en la Macaronesia (donde se incluye Cabo Verde) a través de la reutilización de aguas residuales depuradas, el riego eficiente y la prevención y reducción de la contaminación, que ayuden a superar las barreras normativas, sociales, económicas o tecnológicas existentes, todo ello acompañado por un importante esfuerzo en acciones de sensibilización, información y cualificación a todos los niveles de la sociedad (www.adaptares.com).

Suministro público

La isla tiene aproximadamente el 55% de la población del archipiélago, por lo tanto, el suministro público es el principal uso del agua subterránea. En los asentamientos rurales, las fuentes tienen un papel fundamental en el abastecimiento de la población. Se extienden por toda la isla, pero la mayor importancia la tienen en estas zonas.

El agua potable de Praia proviene principalmente de desalinización (70%), pozos (20%) y manantiales (10%). Estos recursos llegan a la población a través de tuberías y camiones cisterna. Si se encuentran sistemas motorizados en los pozos del interior de la isla, así pues, los habitantes de estas zonas pueden suministrarse con el agua que sacan de los pozos. El suministro de esta agua es también a través de camiones cisterna (Lobo de Pina, 2009).

El consumo personal diario promedio puede variar entre 12 y 64 litros. Esto depende de la facilidad de alcance al recurso, y muestra que hay una falta de agua para gran parte de los habitantes de Santiago.

Saneamiento

En la Isla de Santiago, solo hay un, aproximadamente, 13,3% de los hogares conectados a la red pública de descarga de aguas residuales (INE, 2000). Éste índice aumenta significativamente si se analiza la ciudad de Praia. Hay algunos proyectos de saneamiento básico desarrollados en la mayoría de municipios de la isla, pero no hay datos objetivos.

Las zonas rurales se abastecen de agua de los pozos y el saneamiento básico es a partir de letrinas mejoradas. Normalmente las corrientes son usadas para verter aguas residuales y otros desechos (Lobo de Pina, 2009).

LEGISLACIÓN (AGUAS CABO VERDE)

La actual legislación de aguas de Cabo Verde se rige por el Decreto Ley N° 8/2004. Éste decreto está organizado en cinco capítulos donde se estructuran y analizan los diferentes puntos importantes a la hora de garantizar la salud de las comunidades de Cabo Verde:

- **Capítulo I:** habla de las disposiciones generales. El alcance y objetivo es el de establecer los criterios y normas de la calidad del agua y su clasificación, así como los sistemas de control, régimen sancionador y medidas salvaguardas, con el objetivo de proteger el medio ambiente acuático y en general mejorar la calidad de agua para consumo humano.
- **Capítulo II:** está dedicado al agua para el consumo humano.
- **Capítulo III:** habla de las aguas residuales.

- **Capítulo IV:** se habla del sistema de control y las medidas de salvaguardia. Se definen las medidas de control, las medidas preventivas y las responsabilidades por daños al medio ambiente.
- **Capítulo V:** está dedicado a sanciones. Se organiza en tres artículos donde se habla principalmente del delito administrativo y las multas, de las entidades competentes y de la entrada en vigor de éstas.

2.2. GEOLOGÍA

La cartografía geológica de la isla de Santiago fue publicada por Serralheiro (1976), que juntamente con los trabajos de Matos Alves et al. (1979), establecieron la secuencia volcán-estratigráfica de la isla. Es posible identificar los períodos de intensa actividad volcánica que causó el crecimiento de la isla, separada por la erosión y períodos de sedimentación, que se registran como formaciones sedimentarias intercaladas entre los principales episodios volcánicos. Posteriormente, la geología de la isla fue descrita en Lobo de Pina (2009) cuyo mapa geológico se muestra en la figura 8. Los cortes geológicos que se incluyen en las figuras 9, 10 y 11 proceden también de Lobo de Pina (2009).

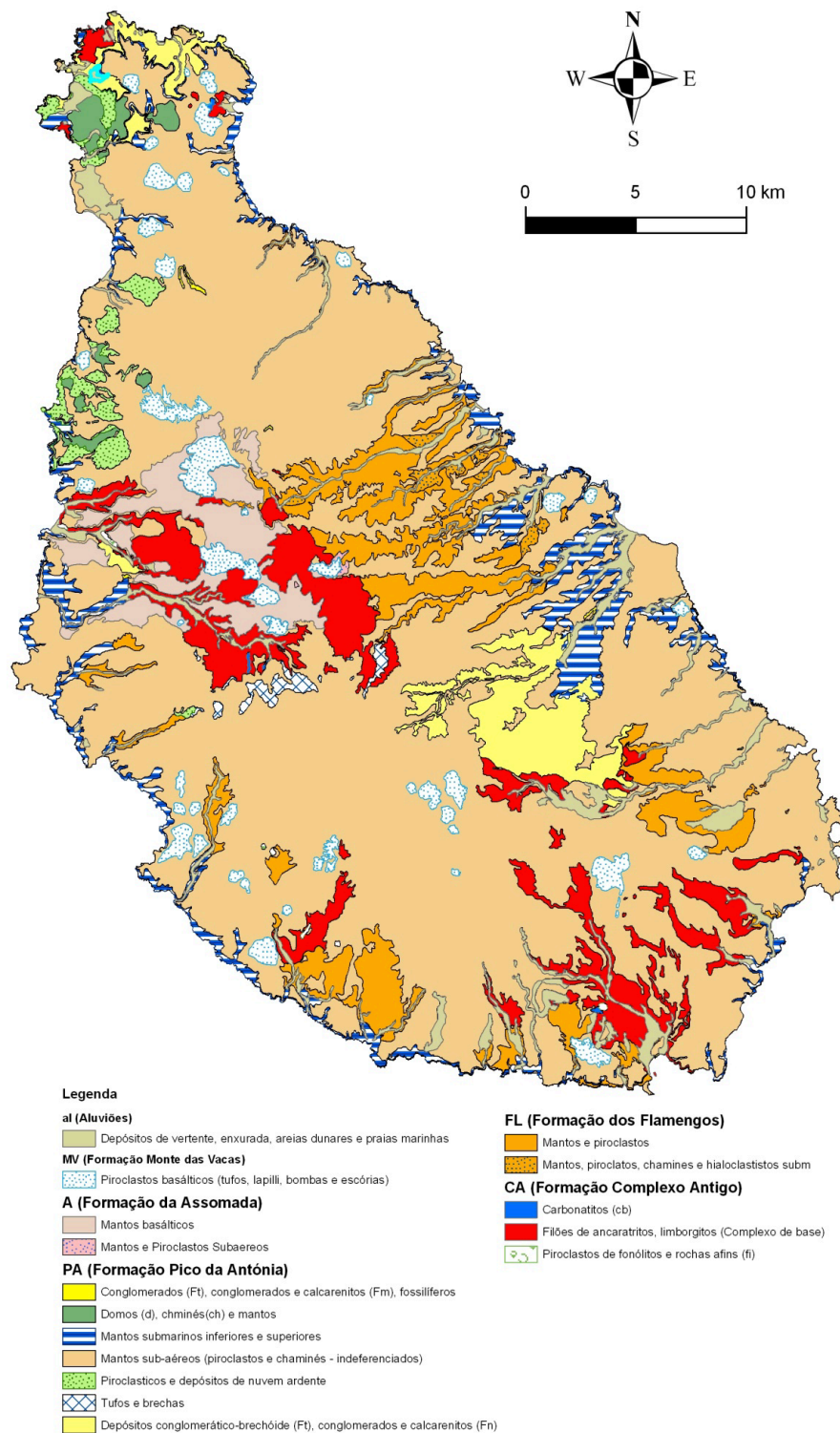


Figura 8: Mapa geológico de la Isla de Santiago (Lobo de Pina, 2009).

La historia geológica de Santiago se puede enumerar en las siguientes fases, de más antigua a más moderna (da Mota Gomes, 2007)(Lobo de Pina, 2009):

- 1 Erupciones submarinas iniciales hasta que emergió el edificio volcánico. Se desconocen las formaciones y tipos petrográficos correspondiente a ellos, con solo el

Antiguo Complejo Interno (CA) como testimonio de parte de esas actividades en el Paleógeno.

- 2 Larga pausa en la actividad volcánica e intensa acción erosiva, con destrucción de los edificios emergidos. Formación de grandes depósitos submarinos correspondiente a los materiales de esos edificios en el Oligoceno y Mioceno temprano.
- 3 Transgresión marina, que elevó el nivel del mar por encima de la altitud de 450 m en el Mioceno inferior.
- 4 Actividad ígnea intensa con formación de mantos extensos y se forma la Formación de Flamengos ($\lambda\rho$), (en la actualidad, en Santiago solo se conocen facies submarinas) en el Mioceno medio.
- 5 Regresión, pero hasta un nivel de no menos de 250 m, asociado con una pausa en la actividad ígnea, y con formación de gruesos depósitos sedimentarios de facies terrestres y armada (Formación de Órgãos (CB)) en el Mioceno medio-superior.
- 6 Intensa actividad ígnea, subaérea y submarina. Hay descansos relativamente largos. Durante la construcción de la mayor parte del edificio volcánico, traducido por discordancias erosivas, y sedimentos en el Mioceno superior.

Mioceno superior

- 7 Continuación de la regresión marina con pequeños períodos transgresivos.
- 8 Fase eruptiva fonolítica y traquítica en el Mioceno superior – Plioceno inferior.
- 9 Reanudación de las actividades de lava basáltica en algunas partes de la isla. La formación de Assomada (A), siendo contemporáneo de las últimas etapas del Complejo Eruptivo del Pico da Antónia (PA) en el Plioceno.
- 10 Fase eruptiva explosiva, desde la formación del Monte das Vacas (MV). Esta fase se prolongó por mucho tiempo, incluso el Plistoceno.
- 11 Transgresión que eleva el nivel del mar hasta al menos 200 m de altitud.

Plioceno Superior

- 12 Regresión por etapas con formación de abrasión y plataformas de sedimentos fosilíferos.

Pleistoceno

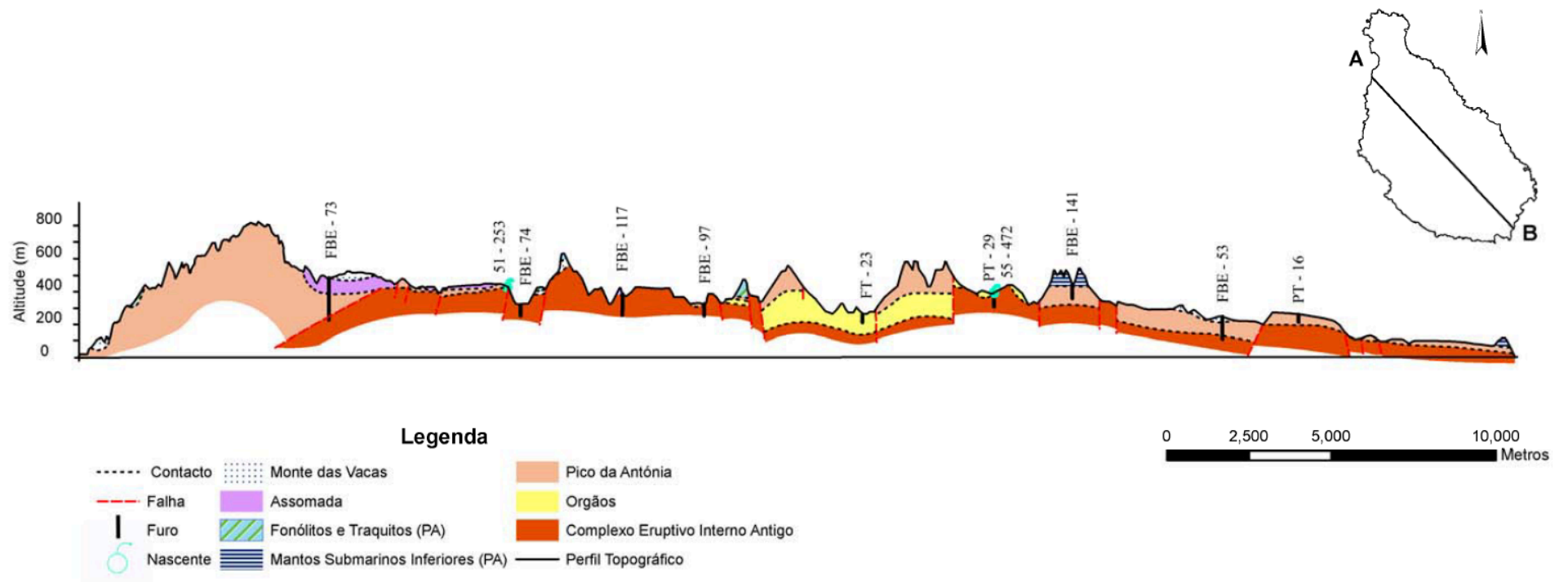


Figura 9: Corte geológico de la Isla de Santiago, dirección NO-SE (Lobo de Pina, 2009).

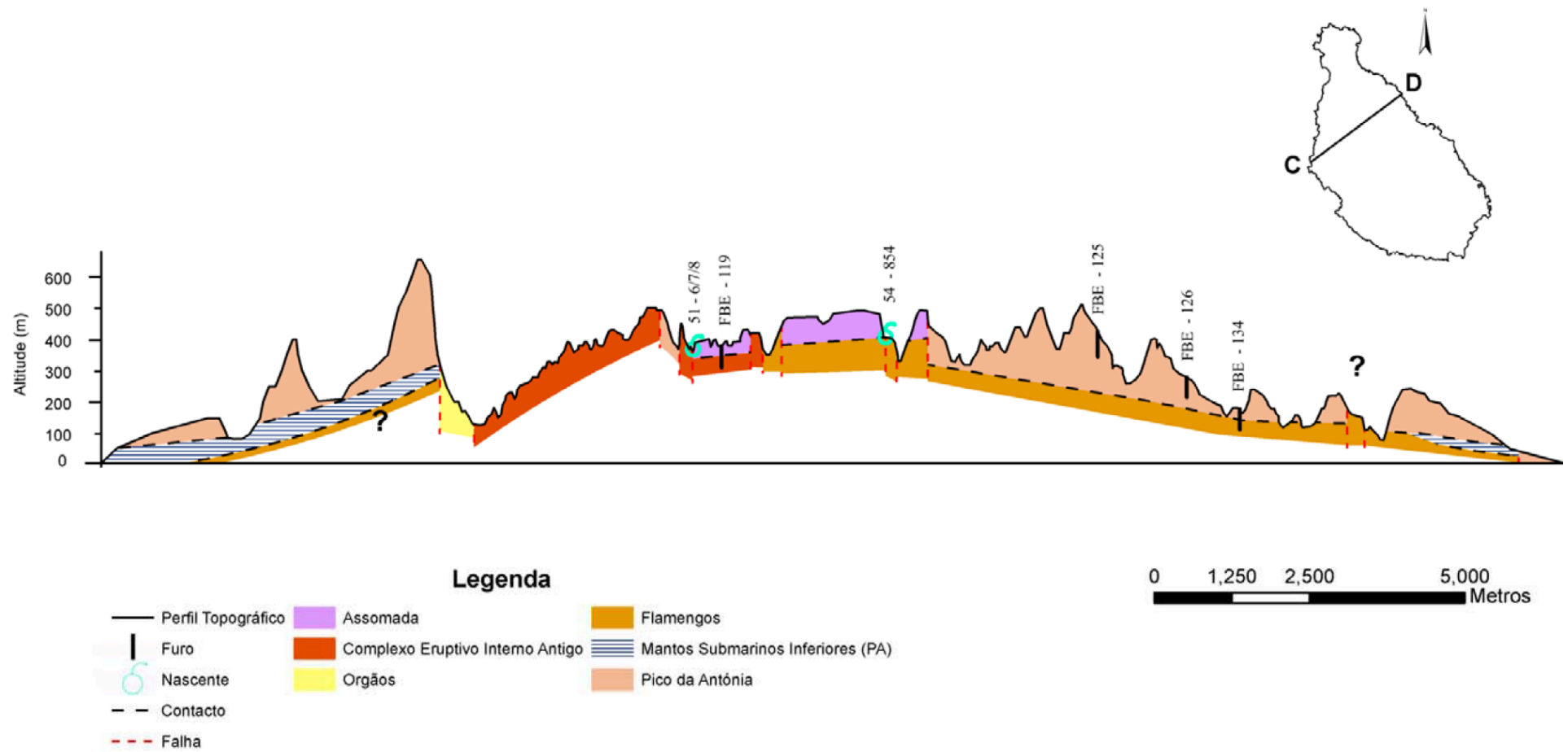


Figura 10: Corte geológico de la Isla de Santiago, dirección NE-SO (Lobo de Pina, 2009).

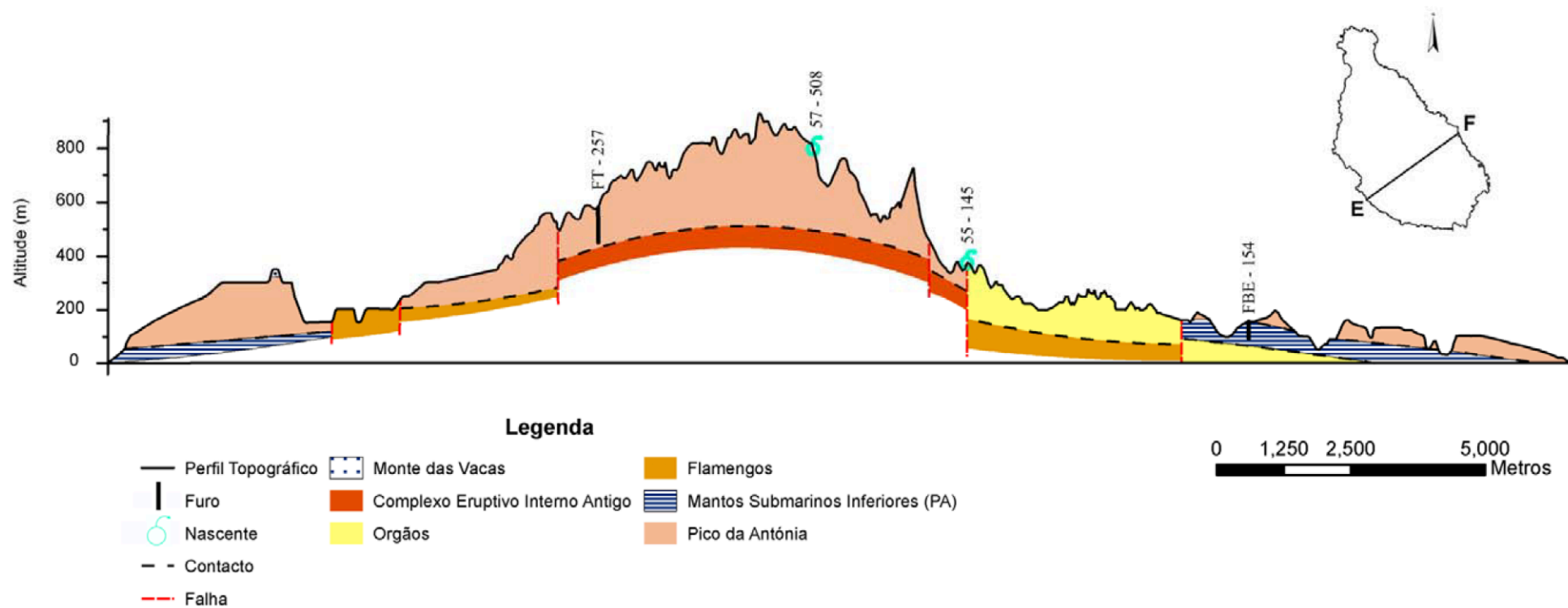


Figura 11: Corte geológico de la Isla de Santiago, dirección NE-SO (Lobo de Pina, 2009)

3. HIDROGEOLOGÍA

En general, en Cabo Verde y, particularmente en Santiago, el agua subterránea se origina en la lluvia que ha sido bastante irregular en los últimos años. De las precipitaciones caídas, una fracción es interceptada por la vegetación que regresa a la atmósfera por evotranspiración, otra llega al mar en forma de inundaciones, o se evapora y la otra parte drena y termina infiltrándose a través de grietas y cavidades de conos piroclásticos en la Formación Monte das Vacas (MV) y mantos submarinos y submarinos del Complejo Principal Eruptivo (PA) (Lobo de Pina, 2009).

Se evita que el agua en su camino continúe infiltrándose ya que encuentra formaciones relativamente impermeables porque están bastante alteradas y con un alto porcentaje de arcilla. Allí se acumula y termina saturando parte de la formación de la AP que se considera el principal acuífero de la isla.

Según el balance hidrogeológico elaborado, se supo que la lluvia que cae sobre el archipiélago de Cabo Verde se divide de la siguiente manera: el 67% se evapora, el 20% de drenajes en forma de escorrentía superficial y el 13% infiltra o recarga el acuífero (Lobo de Pina, 2009).

Con base en los estudios realizados y los datos disponibles actualmente, se pueden establecer 3 unidades hidrogeológicas en Santiago que se pueden ver en la figura 12 (da Mota & Lobo de Pina, 2003):

- **Unidad base:** esta unidad se caracteriza por formaciones más antiguas en las que sus afloramientos ya han alcanzado un alto grado de alteración y, por lo tanto, tienen un cierto porcentaje de arcilla que les da un alto grado de impermeabilidad. En consecuencia, no permite que el agua se infiltre.

La formación de Flamengos ($\lambda\rho$), la formación dos Órgãos (CB) y el Antiguo Complejo Eruptivo Interno (CA) forman parte de esta unidad.

- **Unidad intermedia:** esta unidad constituye la formación del Complejo Eruptivo de Pico de Antónia (PA) y la Formación Assomada (A). Se caracteriza por tener un coeficiente

de almacenamiento muy alto debido a la fractura vertical, la porosidad y la permeabilidad mucho más altas que las de la serie base, lo que permite la circulación y el movimiento del agua, por lo que se considera el principal acuífero en la isla de Santiago. Estas formaciones permiten que el agua circule porque son muy porosas y permeables. La formación de la PA es la más potente y extensa que constituye el acuífero principal.

- **Unidad reciente:** constituida por la Formación Monte das Vacas (MV) formada por conos de materiales piroclásticos que son altamente porosos y permeables. En estas condiciones, el agua que cae sobre esta formación no tiene la posibilidad de ser retenida y, por lo tanto, se dirige preferentemente a la Unidad Intermedia.

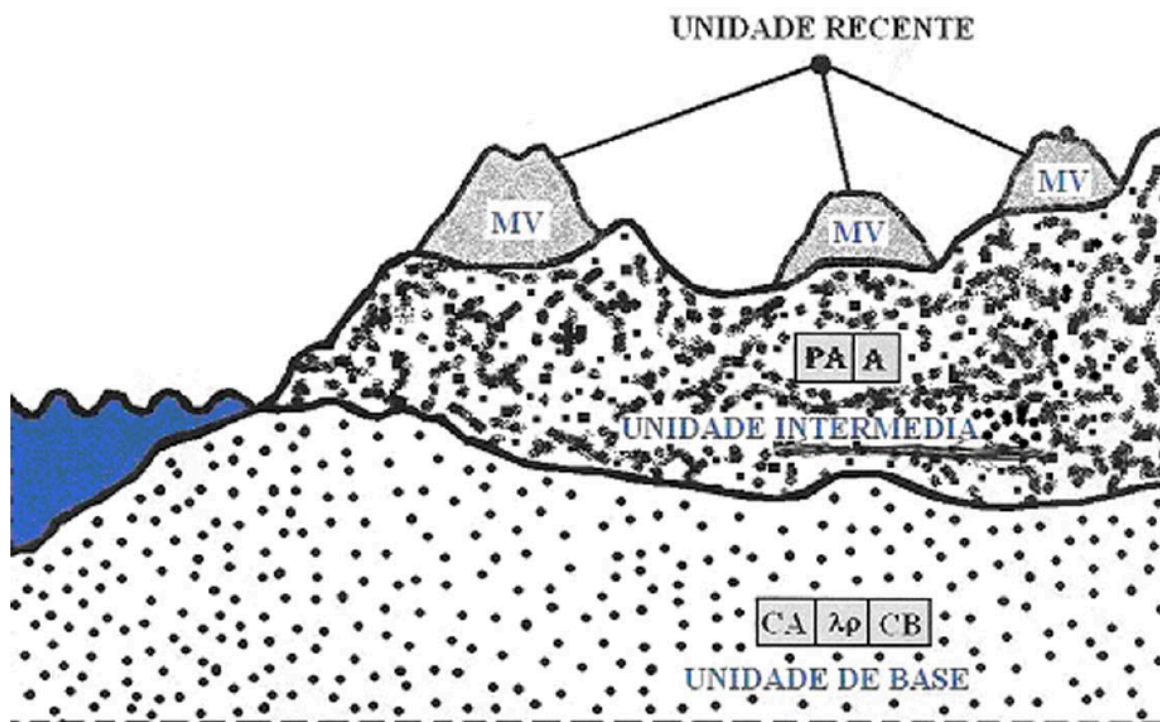


Figura 12: Esquema hidrogeológico general de la isla de Santiago (da Mota Gomes, 2007).

Tabla 4: Características de las unidades hidrogeológicas de la isla de Santiago (Pina, 2009).

Unidades	Formaciones Geológicas	Productividad	Límites de Producción (m³/h)	Caudal Medio Recomendado (m³/h)	Transmisividad (m²/s)
Unidad Base	Complejo Eruptivo Interno Antiguo (CA)	Variable según el grado de fractura y apariencia de las vetas.	0 – 10	3	0,2 a $5 \cdot 10^{-5}$
	Formación de Flamengos ($\lambda\rho$)	Variable según la relación lavas almohadilladas / huecos	0 – 25	5	0,2 a $5 \cdot 10^{-5}$
	Formación de Órgãos (CB)	Variable según el porcentaje de piroclastos y la apariencia de vetas.	0 – 10	3	0,2 a $5 \cdot 10^{-5}$
Unidad Intermedia	Complejo Eruptivo de Pico da Antónia (PA)	Capas de rocas basálticas con intercalaciones de piroclastos y tobas.	0 – 10	5	$1 \cdot 10^{-4}$ a $5 \cdot 10^{-4}$
		Predominio de tobas, huecos y lavas almohadilladas.	0 – 5	3	0,2 a $3 \cdot 10^{-4}$
		Distancia base de grandes capas.	20 – 100	40	10^{-1} a $2 \cdot 10^{-2}$
			10 – 60	30	10^{-1} a $2 \cdot 10^{-2}$
Unidad Reciente	Formación de Assomada (A)	Basalto alveolar y piroclastos	0 – 10	5	10^{-4} a $5 \cdot 10^{-4}$
		Sucesión de coladas potentes	5 – 40	25	
Unidad Reciente	Monte de Vacas (MV)	Zona privilegiada de infiltración	-	-	-
	Aluviones (a)	Variable según el espesor de arcilla y el porcentaje aguas arriba: valles pequeños y espesor reducido. Aguas abajo de los grandes valles: amplios valles y aluviones espesos, gruesos y limpios.	2 – 15 20 – 100	8 40	10^{-4} a 10^{-5} 10^{-1} a $2 \cdot 10^{-2}$

3.1. INVENTARIOS DE PUNTO DE AGUA, ORIGEN DE LOS DATOS

El inventario de puntos de agua es la recolección y análisis de los datos relacionados con la hidrología subterránea del acuífero o zona en cuestión. Éste proviene de la información de los puntos de agua (da Mota Gomes, 1980).

Es importante conocer los datos con su ubicación geográfica, características topográficas, climáticas, geomorfológicas y geológicas, las características del pozo o manantial, y los parámetros físico-químicos del agua.. Éstos conjuntamente con la realización del inventario de puntos de agua, proporciona un valor inicial de agua extraída en la zona. Todo esto es un factor importante en una buena gestión de los recursos hídricos ya que no dejan de ser salidas del acuífero. Además es importante tener información también del uso del agua, su calidad, la cantidad de horas diarias de bombeo y otra información complementaria.

Para saber la evolución en el tiempo y la explotación del acuífero es muy importante tener la evolución histórica de los flujos, los niveles piezométricos y las características químicas y biológicas. Todos estos datos serán decisivos en acciones futuras en ese acuífero.

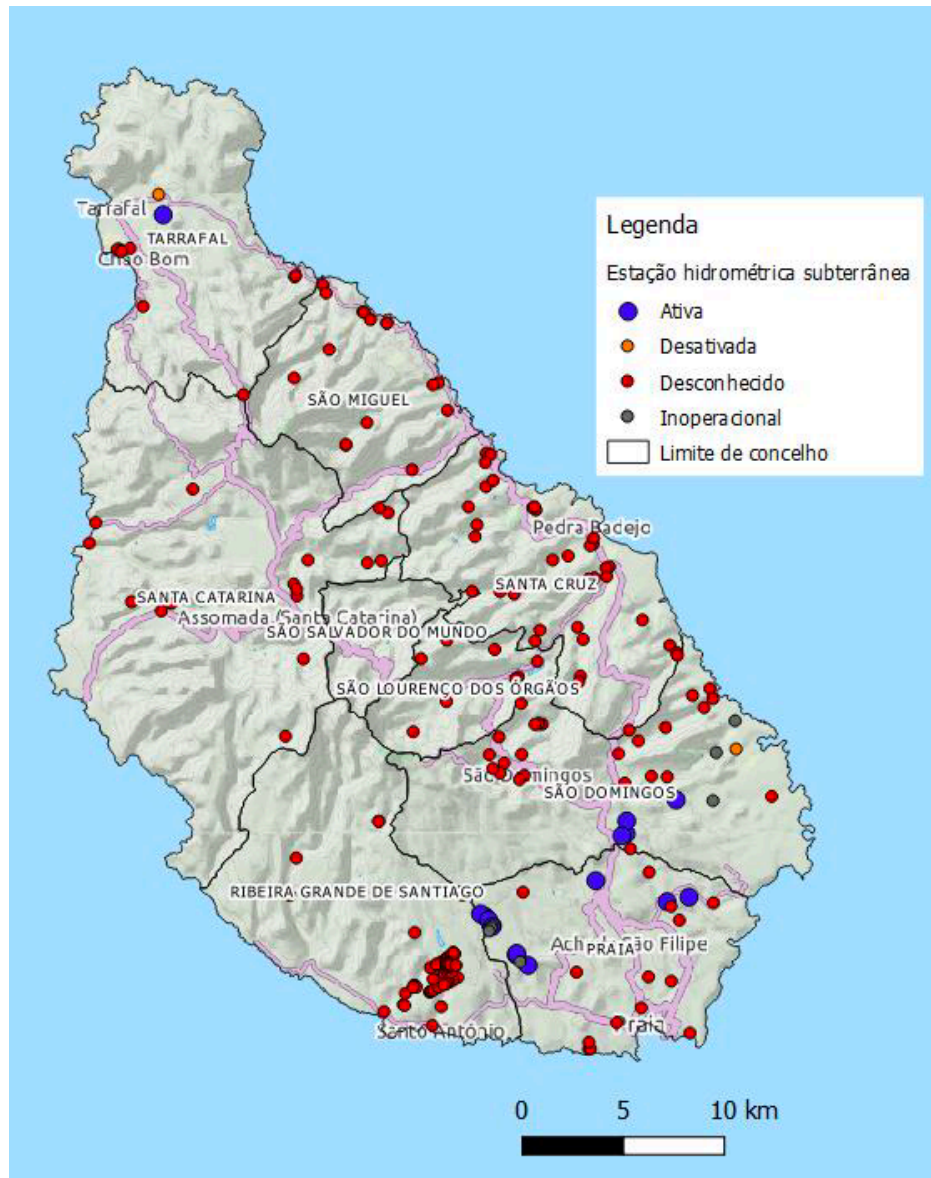
A menudo, el propietario o usuario de los puntos de agua facilita la información de datos sobre esta evolución que, aunque dispersos, incompletos o inexactos, todavía tienen cierta importancia en el conocimiento de hidrogeología de la zona considerada, ya que, con eso, será posible reconstituir la historia del acuífero y obtener información muy valiosa, especialmente con respecto a considera el comportamiento del acuífero hacia la exploración.

Tras la finalización del inventario sistemático, analítico y detallado de puntos de agua realizados, da Mota Gomes (2007) detalla un programa para la exploración de puntos de agua fue de agua de la isla de Santiago. De estos puntos de agua inventariados se seleccionaron los de mayor productividad, con indicación de los volúmenes extraídos.

El inventario actual de puntos de agua en INGRH (Instituto Nacional de Gestão de Recursos Hídricos) incluye: 1.074 pozos, 1.199 manantiales y 780 perforaciones / piezómetros (Pina, 2009).

3.2. PIEZOMETRÍA

Según Proença de Oliveira et al. (2017), hay 404 estaciones piezométricas, 217 de las cuales están georreferenciadas que se pueden ver en la figura 13. Las mediciones de nivel piezométrico cubren el período 1972-2016.



Se cree que el flujo subterráneo natural de la isla de Santiago sigue la topografía, es decir, se mueve desde las zonas más altas a las más bajas y se descarga en las principales líneas de agua superficial como son los arroyos y en el mar (Lobo de Pina, 2009).

El gradiente natural varía según la posición en la isla: en las áreas más altas es del 5%, en cambio en las áreas más cercanas a la costa disminuye hasta el 0,8%. Esto queda representado en la figura 21. Lo que muestran los análisis de los mapas piezométricos es también un cambio en el patrón del flujo natural a consecuencia de la explotación de los recursos hídricos de la isla.

Actualmente hay ciertas zonas en la costa este, sur de la isla y las áreas del norte, donde el flujo natural está invertido, cosa que potencia la intrusión salina y supone un riesgo para la calidad del agua subterránea. Esto se puede ver en la figura 14 donde se indicaron las principales direcciones del flujo subterráneo y se usaron los colores más fuertes (rojo, naranja y amarillo) para indicar las áreas donde el nivel piezométrico está por debajo del nivel medio del mar (Lobo de Pina, 2009).

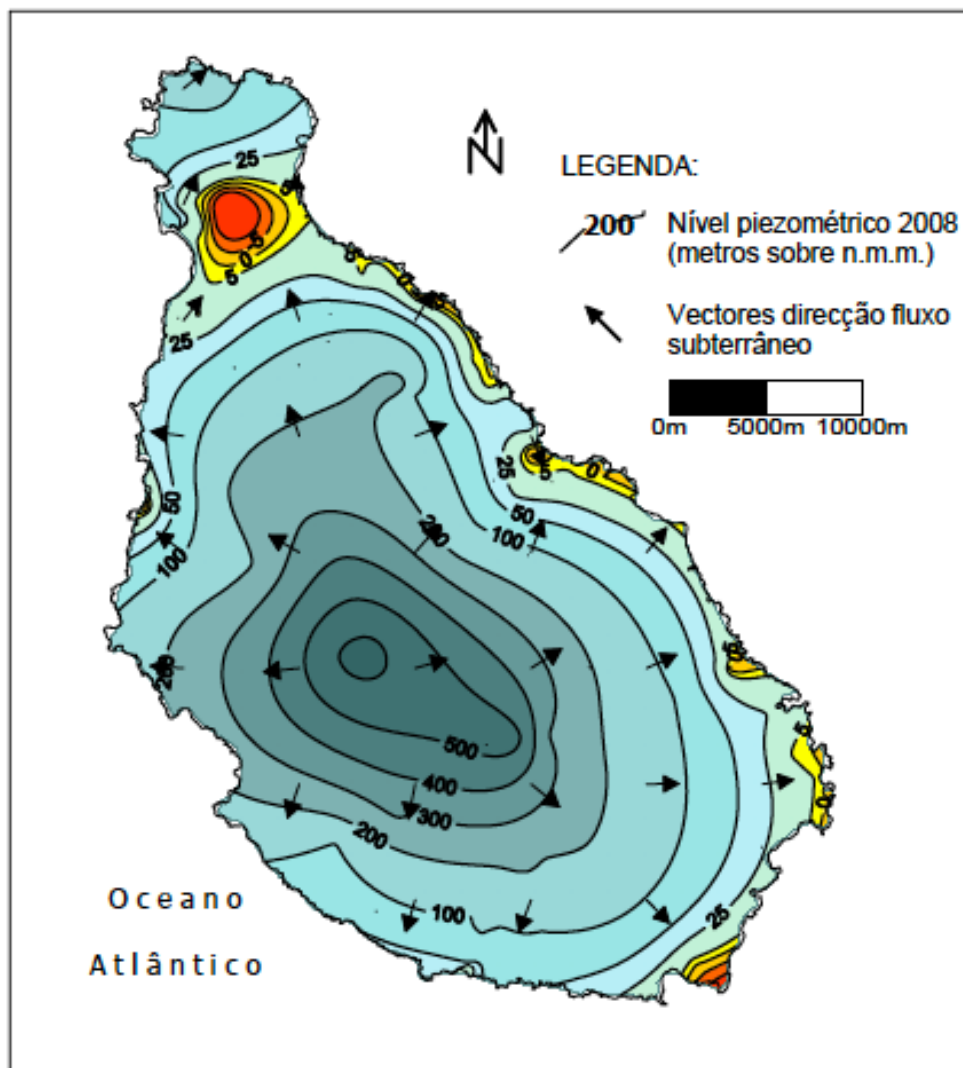


Figura 14: mapa piezométrico de la Isla de Santiago, 2008 (Lobo de Pina, 2009).

3.3 IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA Y DESCARGA

La isla de Santiago a nivel hidrogeológico, presenta un acuífero central formado esencialmente por los materiales de la unidad intermedia (la formación de Assomada y Pico da Antónia). Éste acuífero tiene un mayor grosor en la parte central y se estrecha hacia la costa. La infiltración que recibe es directa o diferida de la precipitación del agua de lluvia o la condensación de niebla. Es drenada por los arroyos y manantiales que surcan la isla hacia el mar (figura 15). Puede haber una descarga directa al mar también a lo largo de la costa, en las zonas donde el gradiente hidráulico es positivo (Lobo de Pina, 2009).

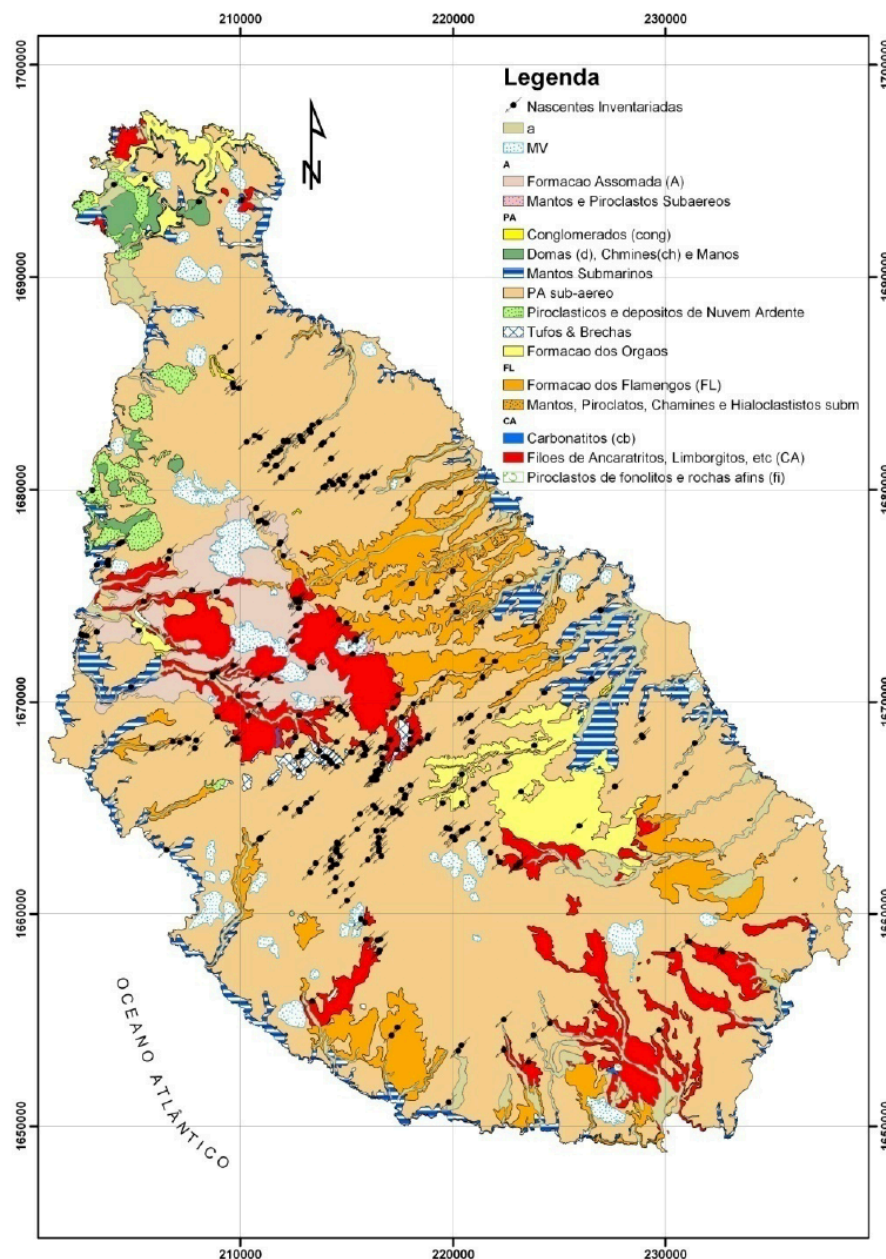


Figura 15: mapa de manantiales la Isla de Santiago (Lobo de Pina, 2009).

La unidad base es la que forma la parte impermeable del sistema acuífero de la isla. Aun así, hay zonas de la isla que estas formaciones están cruzadas por cantidad de diques, cosa que hace que puedan actuar como zonas preferenciales de descarga subterránea. Ésta red puede ser tan intensa que puede compartimentar y confinar localmente el sistema acuífero.

Finalmente, las formaciones de la unidad reciente actúan como áreas de infiltración preferenciales para el acuífero central. Generalmente, son formaciones con una permeabilidad muy alta (ver tabla 4), sobre todo Monte das Vacas, que debido a su litología piroclástica tiene una alta permeabilidad (Lobo de Pina, 2009).

A continuación se presenta un modelo hidrogeológico conceptual (figura 16), donde se pueden ver las diferentes partes de las que se ha hablado, y zonas de recarga y descarga.

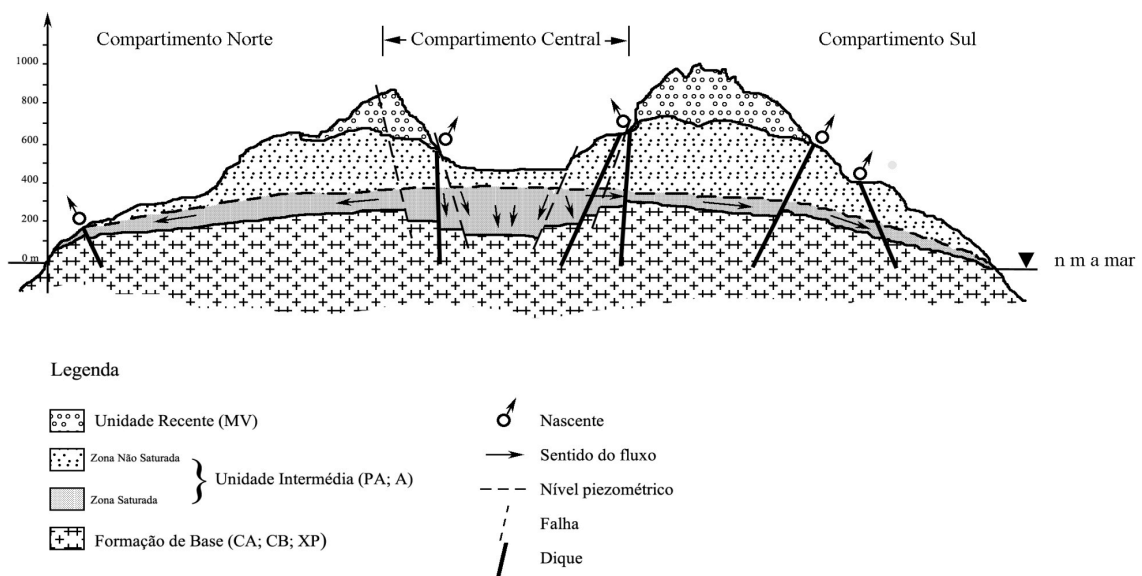


Figura 16: modelo hidrogeológico conceptual de la Isla de Santiago (Lobo de Pina, 2009).

3.4. HIDROGEOQUÍMICA

El ciclo geoquímico global de la corteza terrestre está principalmente controlado por la alteración química de las rocas. El encargado principal de este proceso de alteración es el agua, por lo tanto, hay un consumo de CO₂ y una liberación de metales y otros elementos en estado soluble, que dan lugar a nuevas rocas o minerales. También hay factores biológicos y físicos que afectan y contribuyen a estas variaciones.

Las rocas volcánicas que forman la Isla de Santiago son básicamente basálticas. El grupo de rocas de origen volcánico, por sus características, son de las que más sensibles son a diversidad de alteraciones químicas (disolución, hidrólisis y oxidación). El grado de cambio químico es controlado por varios factores, como: el clima, el tipo de roca, el tiempo que ha durado la interacción agua-roca y la composición química del agua que se infiltra (temperatura y pH). Uno de los factores más importantes en el cambio es el clima, ya que delimita la cantidad de agua disponible (precipitaciones), por lo tanto, si hay escasez de agua como es el caso de Cabo Verde, los procesos serán más lentos.

Otro factor influyente es, evidentemente, el tipo de roca presente en la zona y sus propiedades de estructura y textura, ya que de esto depende la forma en la que circula el agua dentro de la roca, y composición mineralógica, que tiene un papel clave en la composición catiónica final del agua subterránea.

La Isla de Santiago es un caso de vulcanismo reciente. Esto hace que la disolución de grandes cantidades de dióxido de carbono procedente de la actividad volcánica confiere un aumento de agresividad al agua que, con la presencia de gradientes geotérmicos, hace que haya una fácil liberación de iones en solución.

En el estudio de Lobo de Pina (2009), hicieron distintos análisis en puntos concretos de la isla para determinar características como temperatura, pH y conductividad, pero también para determinar qué presencia de los iones disueltos en el agua subterránea.

Temperatura

La temperatura es un factor muy influyente ya que determina la solubilidad de minerales y gases. Es un factor importante para la caracterización del agua subterránea ya que en ambientes volcánicos, suele haber gradientes térmicos importantes. En la Isla de Santiago, no hay variaciones de temperatura muy elevadas en el agua subterránea. Las diferentes temperaturas se relacionaron con la profundidad del nivel del acuífero y con la proximidad a la costa.

Si se observa la figura 17, se puede ver que la temperatura del agua subterránea es:

- Unidad Base → entre 21,4 - 29,8 °C
- Unidad Intermedia → entre 20,3 - 34,9 °C
- Unidad Reciente → entre 23,6 - 28,5 °C

Los valores extremos se observaron en la Unidad Intermedia, la principal unidad hidrogeológica de la isla. Sin embargo, si consideramos los valores medio y mediano, las variaciones en la temperatura del agua subterránea pueden considerarse insignificantes ($<1^{\circ}\text{C}$) (Lobo de Pina, 2009)

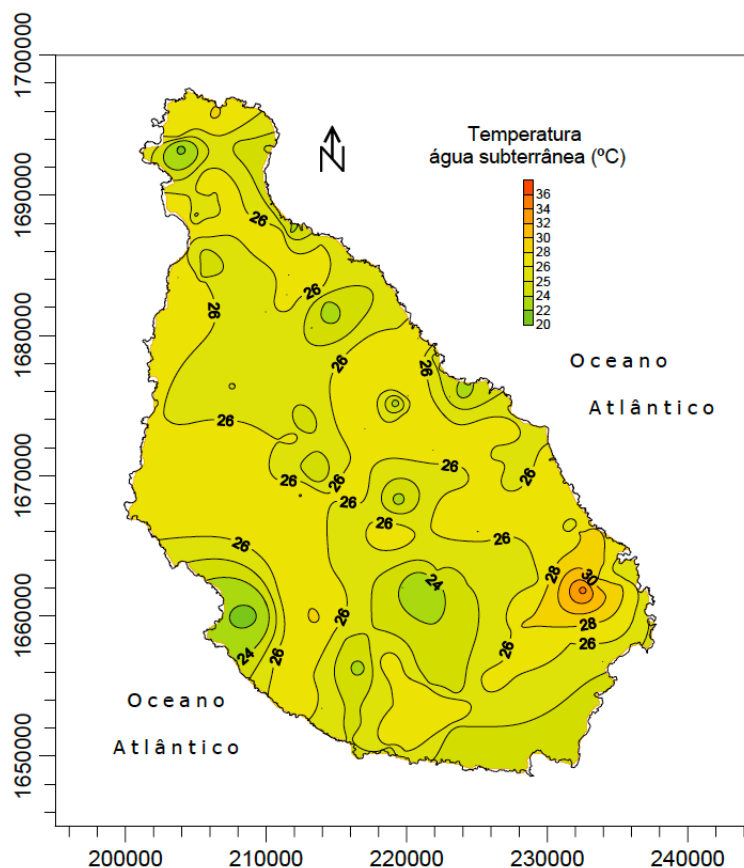


Figura 17: mapa de temperaturas de las aguas subterráneas de la Isla de Santiago (Lobo de Pina, 2009).

pH

Tener medidas de pH es importante ya que interviene en equilibrios ácido-base, hidrólisis y polimerización, adsorción, reducción de oxidación y define los estados de saturación en relación con los diversos minerales.

En la Isla de Santiago los valores de pH varían desde ligeramente ácido hasta cercano a neutro en el medio al este de la isla, y valores de pH superiores a 7,25 en la mitad occidental de la isla. Los valores del pH son (Lobo de Pina, 2009):

- Unidad Base → entre 6.0 - 7.6
- Unidad Intermedia → entre 5.7 - 8.2
- Unidad Reciente → entre 6.5 - 7.5

Los valores más extremos se observan de nuevo (figura 18) en la Unidad Intermedia, principal unidad hidrogeológica de la isla y la más explotada para satisfacer las necesidades de la población. Esto hace que la interacción roca-agua sea de tiempo más corto y por lo tanto, un pH más bajo.

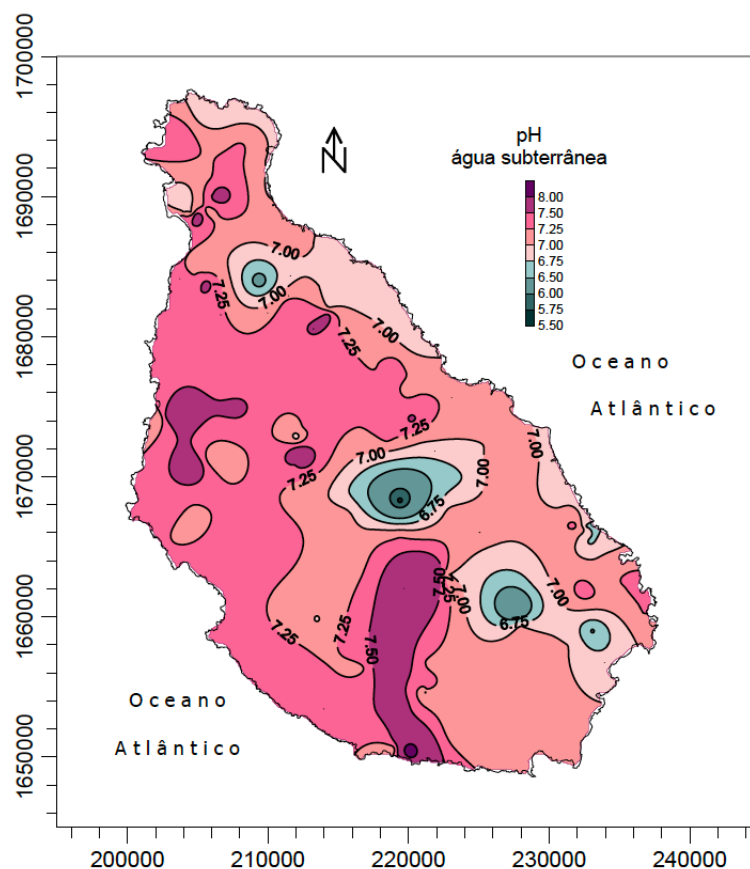


Figura 18: mapa de pH de las aguas subterráneas de la Isla de Santiago (Lobo de Pina, 2009).

Conductividad

En aguas subterráneas, los valores de conductividad eléctrica se utilizan normalmente como indicadores del grado de mineralización. Sin embargo, el aumento de la conductividad eléctrica puede resultar no solo de los procesos naturales de interacción agua-roca (es decir, disolución) sino también de procesos de contaminación (industrial, doméstico, agrícola, intrusión salina), por lo que a menudo también se usa en el seguimiento de estos procesos antrópicos.

En la Isla de Santiago encontramos que la conductividad tiene valores más altos en zonas cercanas a la costa y más bajos en el interior. Como se muestra en la figura 19, en la costa oeste los valores de conductividad eléctrica son más bajos que en la costa este. Esto se debe a que la costa oeste es más alta y empinada, lo que significa que hay mucha menos población y naturalmente menos extracción de agua subterránea. También se puede ver que existen dos áreas (norte y sur) donde las conductividades eléctricas son bastante bajas ($<400 \mu\text{S/cm}$). Son hoyos y manantiales que exploran la Unidad Intermedia. En la zona sur se puede ver cómo aumenta la conductividad hacia el mar (Lobo de Pina, 2009).

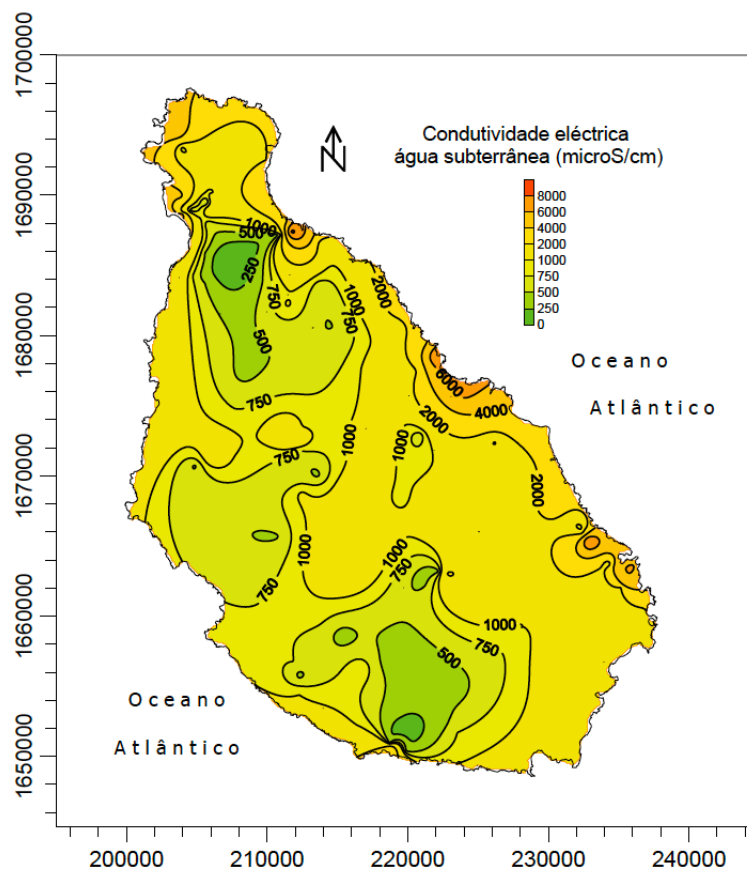


Figura 19: mapa de la conductividad eléctrica de las aguas subterráneas de la Isla de Santiago (Lobo de Pina, 2009).

Cationes

En las islas volcánicas, la reacción con los minerales que constituyen las rocas aparece cuando el agua subterránea se infiltra y hay un contacto directo con las unidades hidrogeológicas que las forman. Estos minerales se disuelven, dando lugar a diferentes

componentes en solución, que a veces reaccionan nuevamente, dando lugar a minerales secundarios de solubilidad mucho más baja.

Los cationes son aquellos que normalmente tienen mayores afinidades e interacciones con el entorno rocoso que los originó. En la isla de Santiago, el catión más abundante en el agua subterránea es el sodio, seguido de magnesio, calcio, silicio y potasio. Todos estos cationes se originan a partir de procesos naturales de interacción agua-roca y procesos mejorados por la actividad humana, como la intrusión salina y la contaminación agrícola (Lobo de Pina, 2009).

- **Sodio (Na)**

El catión más abundante en las aguas subterráneas de la Isla de Santiago es el sodio. Representa un 55% del total de cationes en solución, por lo tanto es relevante en la mineralización total del agua. El origen del sodio puede ser: marino, rocas alcalinas (unidad intermedia) o intrusión salina.

Como muestra la figura 20, una gran parte de la isla tiene valores inferiores a 100-150 mg / l, que deberían corresponder a las concentraciones naturales en el acuífero y ser el resultado de la infiltración de agua de lluvia. Los valores más altos probablemente son el resultado de los fenómenos de mezcla con agua de mar (intrusión salina) (Lobo de Pina, 2009).

Los valores de sodio de las aguas subterráneas son:

- Unidad Base → entre 19,7 y 438 mg / l (120-170 mg / l promedio)
- Unidad Intermedia → entre 22,6 y 652 mg / l (120-170 mg / l promedio)
- Unidad Reciente → entre 67,6 y 1349 mg / l (>300 mg / l promedio)

Los valores más altos se observan en la Unidad Reciente, por ser la más permeable y más explotada cerca de la costa.

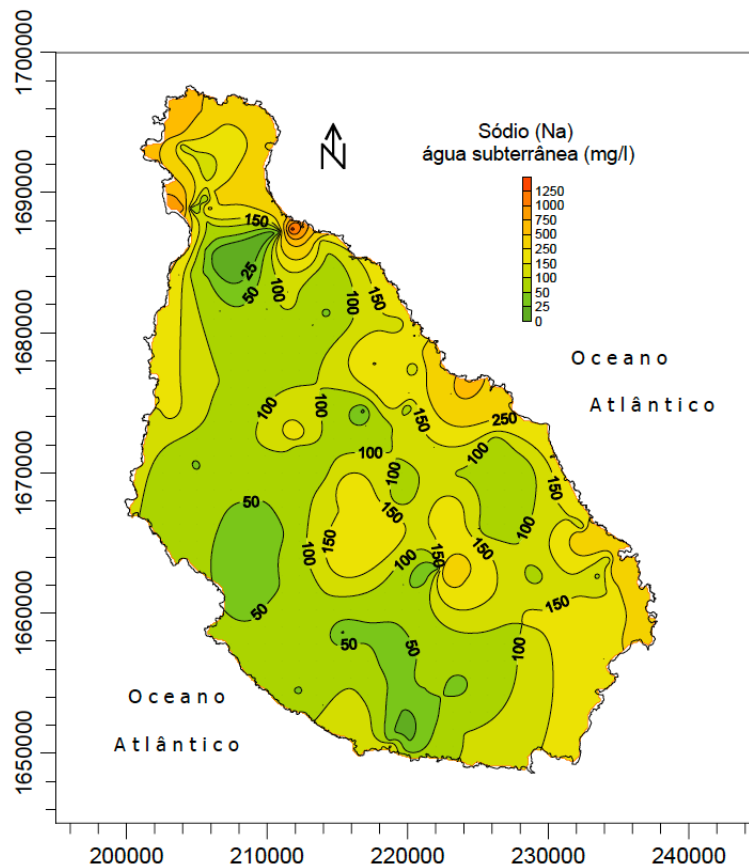


Figura 20: Mapa de la Isla de Santiago con las concentraciones sodio (Lobo de Pina, 2009).

- **Magnesio (Mg)**

El magnesio es el segundo catión más abundante en las aguas subterráneas de la Isla de Santiago. En la figura 21, se puede ver en la mayor parte de la isla de Santiago las concentraciones de magnesio son superiores a 25 mg / l y que las concentraciones más altas ocurren cerca de la costa. Los valores de magnesio son (Lobo de Pina, 2009):

- Unidad Base → entre 16,5 y 116,6 mg / l
- Unidad Intermedia → entre 5,8 y 1139,7 mg / l
- Unidad Reciente → entre 22,4 y 3295,1 mg / l

El origen del magnesio puede relacionarse con las concentraciones de éste en las rocas volcánicas de la isla de Santiago o con la hidrólisis de silicatos y aluminosilicatos.

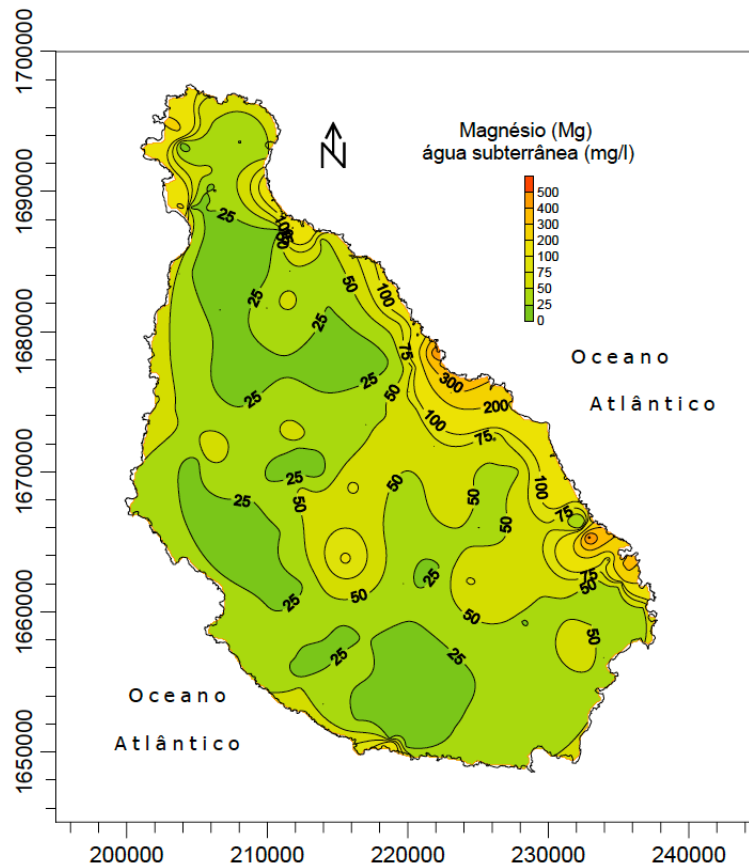


Figura 21: Mapa de la Isla de Santiago con las concentraciones magnesio (Lobo de Pina, 2009).

- Calcio (Ca)

El calcio también es muy presente en las aguas subterráneas de la Isla de Santiago, pero el menos abundante. Eso significa que su presencia en las principales formaciones hidrogeológicas será limitada.

Al analizar la figura 22, se puede ver que las concentraciones más altas están a lo largo de la costa este y en la parte noroeste de la isla. Su origen puede estar relacionado con: la disolución de minerales carbonatados, disolución de rocas en la parte noroeste de la isla, con la hidrólisis y la alteración de minerales o procesos de intrusión salina. Los valores varían entre (Lobo de Pina, 2009):

- Unidad Base → 8,0 y 126,4 mg / l
- Unidad Intermedia → 6,4 y 1280 mg / l
- Unidad Reciente → 32,0 y 3496 mg / l

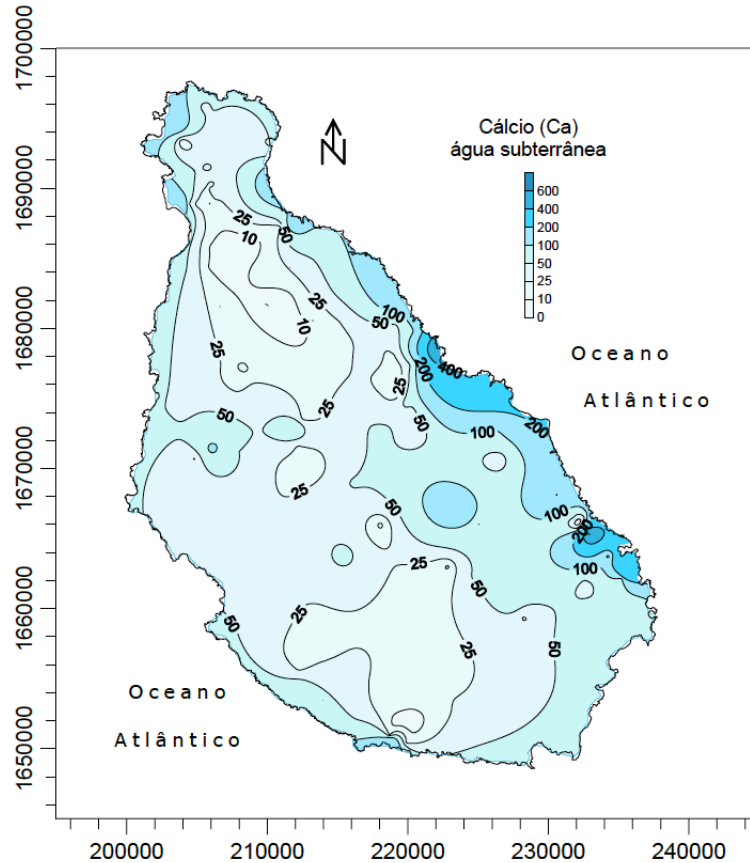


Figura 22: Mapa de la Isla de Santiago con las concentraciones calcio (Lobo de Pina, 2009).

- Silicio (Si)

El contenido de silicio en el agua subterránea es relativamente alto y no varía significativamente entre las tres unidades hidrogeológicas. Éstas concentraciones resultan principalmente de la hidrólisis de minerales de silicato. La mayoría de las muestras de agua subterránea muestran saturación con respecto a la sílice (Lobo de Pina, 2009).

La figura 23 muestra los datos estadísticos sobre la variación en los valores de silicio en las tres unidades hidrogeológicas principales en la isla de Santiago.

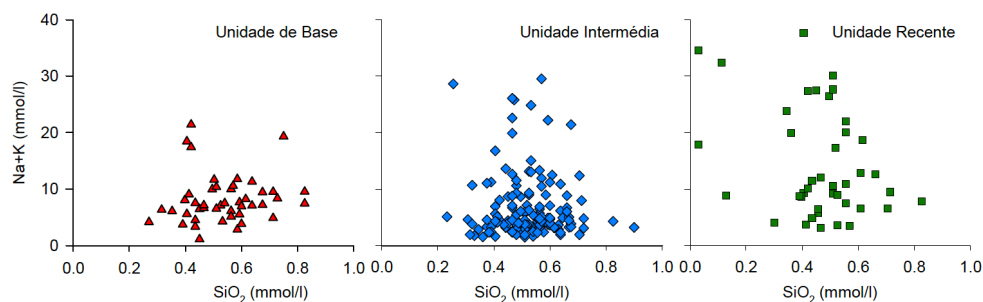


Figura 23: Diagramas de álcali-silíce total en las tres unidades geológicas de la Isla de Santiago (Lobo de Pina, 2009).

- Potasio (K)

Del análisis espacial de potasio en las aguas subterráneas de la isla de Santiago, como vemos en la figura 24, se puede observar que las concentraciones más altas se observan en áreas donde predomina la Unidad Base (Antiguo Complejo Eruptivo Interno), tanto en la parte central como en la Parte norte y suroeste de la isla. En el área de Ribeira dos Flamengos también hay concentraciones más altas.

La presencia de ion potasio en las aguas subterráneas también puede estar relacionada con algunos factores de origen antrópico, como la contaminación agrícola, ya que el potasio se utiliza en la composición química de los fertilizantes. Los valores de potasio en las aguas subterráneas (Lobo de Pina, 2009):

- Unidad Base → entre 4.1 y 51.7 mg / l
- Unidad Intermedia → entre 1.8 y 64.6 mg / l
- Unidad Reciente → entre 6.0 y 347,9 mg / l

En términos de valores promedio, las tres unidades hidrogeológicas tienen valores que varían entre 10 y 20 mg / l, siendo la Unidad Reciente la que presenta los valores promedio más altos.

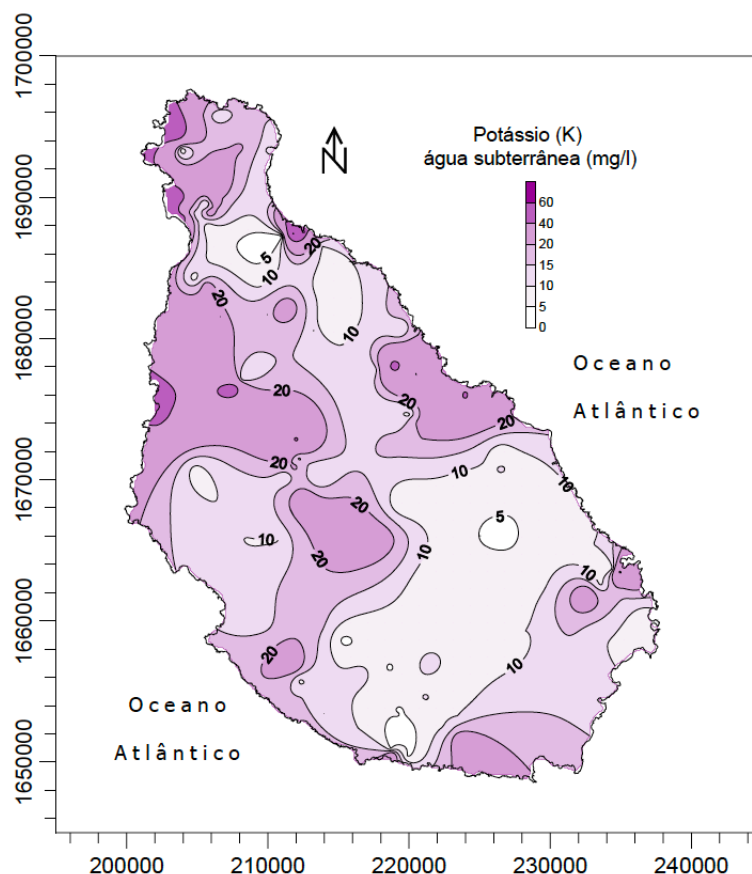


Figura 24: Mapa de la Isla de Santiago con las concentraciones de potasio (Lobo de Pina, 2009).

Aniones

Los aniones muestran, en general, menos afinidad con el entorno rocoso que los originó. En la isla de Santiago, el anión más abundante en el agua subterránea es el bicarbonato, seguido de cloruro, sulfato y nitrato. Algunos de estos aniones pueden tener su origen en los procesos naturales de interacción agua-roca y otros resultan principalmente de procesos mejorados por la actividad humana, como la contaminación agrícola (Lobo de Pina, 2009).

- Cloruro (Cl)

El cloruro resulta directa o indirectamente del agua de mar. Su principal fuente es el aerosol marino, que transporta y deposita sales de cloruro de sodio que se disuelven fácilmente en agua de lluvia y niebla, infiltrándose profundamente. La otra fuente de cloruro son los procesos de intrusión salina que ocurren a lo largo de toda la costa oriental de Santiago (Lobo de Pina, 2009).

Se pueden ver las distintas concentraciones, distribuidas espacialmente, en la figura 25. Los valores de cloruro son:

- Unidad Base → entre 49,6 y 535 mg / l
- Unidad Intermedia → 26,2 y 5708 mg / l
- Unidad Reciente → entre 42,5 y 14003 mg / l

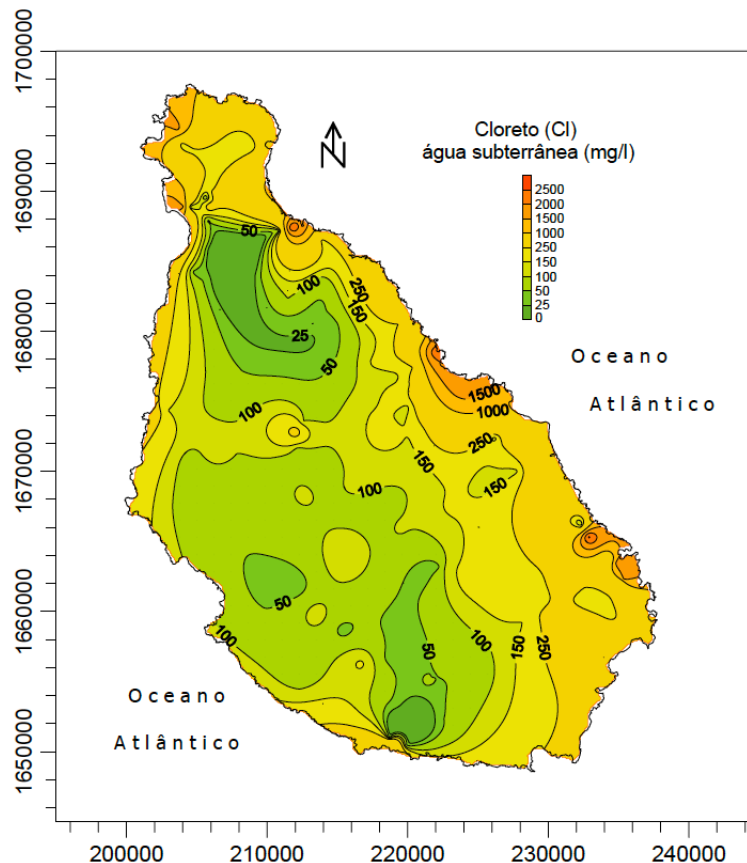


Figura 25: Mapa de la Isla de Santiago con las concentraciones de cloruro (Lobo de Pina, 2009)

- **Bicarbonato (HCO_3)**

El bicarbonato es el anión más importante en las aguas subterráneas de la Isla de Santiago. Sus concentraciones más altas se encuentran en las áreas interiores y principales de recarga de la isla (figura 26). Éste ion tiene su origen en la infiltración del agua de recarga y en la disolución de minerales carbonatados y / o reacción con minerales de silicato. También hay una alta relación entre las concentraciones de bicarbonato y el pH del agua subterránea, lo que indica que este ion puede tener un papel determinante en el comportamiento de los valores de pH muy cercanos a la neutralidad (Lobo de Pina, 2009).

En términos de valores promedio, las concentraciones de bicarbonato varían entre 180 y 300 mg / l disminuyendo desde la Unidad Base > Unidad Intermedia > Unidad Reciente.

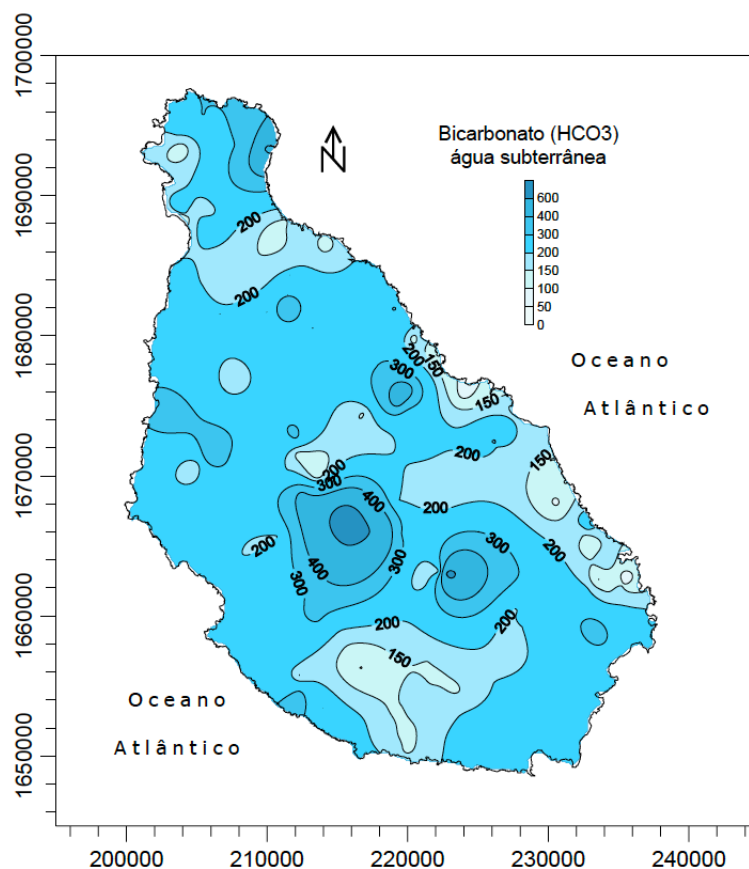


Figura 26: Mapa de la Isla de Santiago con las concentraciones de bicarbonato (Lobo de Pina, 2009)

- Sulfato (SO_4)

De la concentración aniónica total, el 10% proviene del sulfato, así que es de los menos abundantes. Sin embargo, hay un aumento en la concentración de sulfato en la parte centro-oriental de la isla que puede estar relacionado con la presencia de rocas carbonatadas correspondientes a las facies marinas de la Formación dos Órganos. A lo largo de la costa, el sulfato también aumenta en las áreas de intrusión salina, ya que es uno de los iones más abundantes en el agua de mar. Ésta distribución puede verse representada en la figura 27 (Lobo de Pina, 2009).

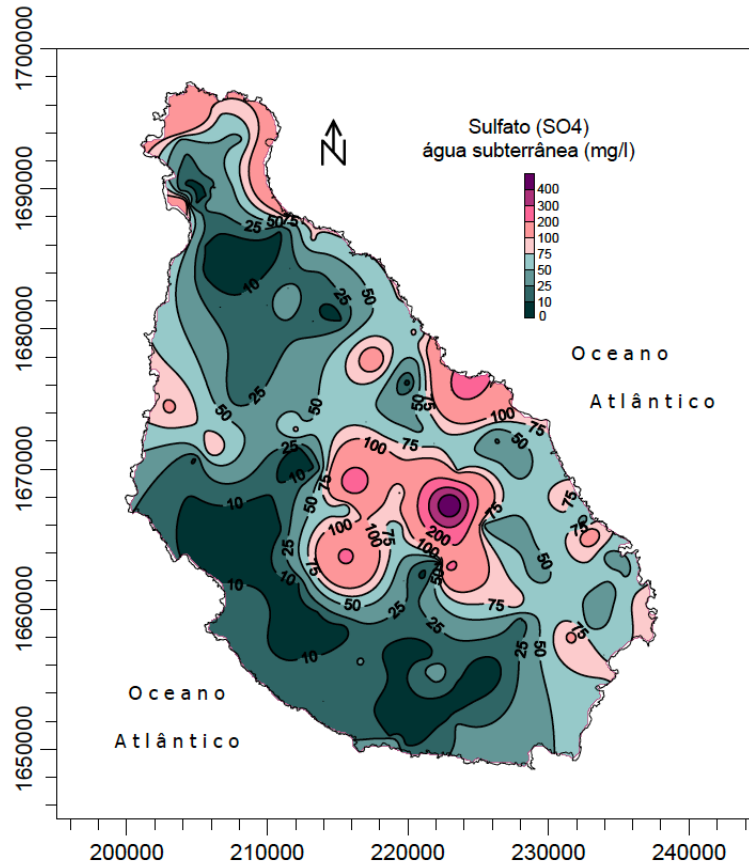


Figura 27: Mapa de la Isla de Santiago con las concentraciones de sulfato (Lobo de Pina, 2009)

- Nitrato (NO₃)

En la isla de Santiago, los nitratos no existen en condiciones naturales, por lo tanto, su presencia puede estar asociada a: contaminación producida por la agricultura, tanques sépticos o por la ausencia de una red de drenaje de aguas residuales. De las muestras de agua subterránea estudiadas alrededor del 96% tenían concentraciones positivas de nitratos y aproximadamente el 15% excedió el valor máximo permitido para el consumo humano (Lobo de Pina, 2009).

En la figura 28 se puede ver la distribución de estos nitratos y sus concentraciones preocupantes.

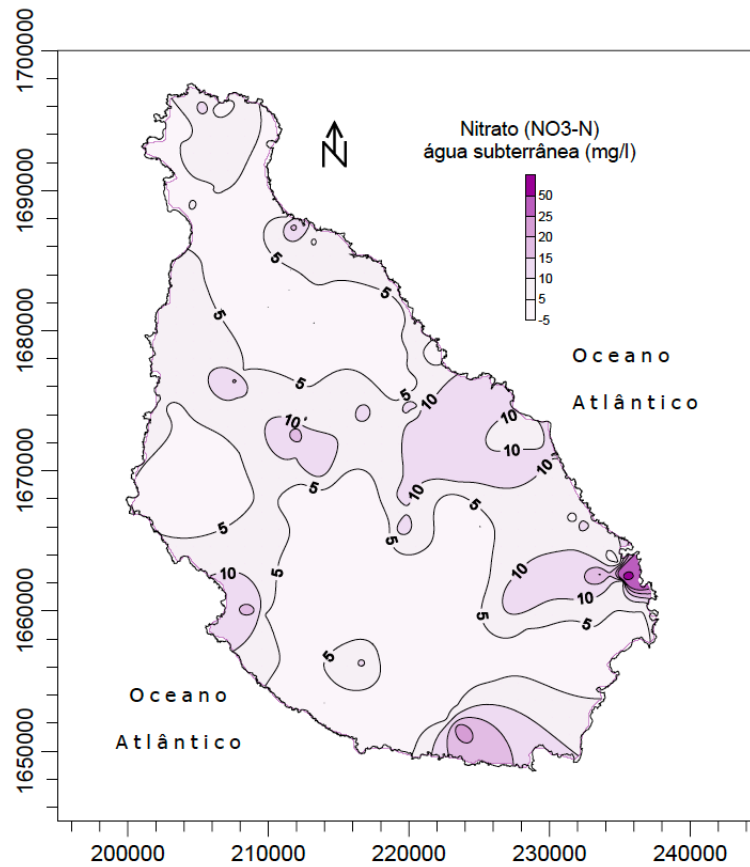


Figura 28: Mapa de la Isla de Santiago con las concentraciones de nitrato (Lobo de Pina, 2009).

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La Isla de Santiago se abastece, en gran parte, del agua subterránea que contiene su acuífero principal, sobre todo en las partes más alejadas de la ciudad de Praia y en las zonas más rurales. Por eso es que éste tiene una importancia muy grande para los habitantes de la isla.

En este trabajo se ha querido recoger la información existente respecto a las características generales de la isla, geología e hidrogeología, para comprender su estado actual y su funcionamiento.

La isla de Santiago tiene un clima semiárido, caracterizado por dos estaciones principales, pero mayoritariamente con precipitaciones poco abundantes. Este es uno de los motivos principales por los cuales el agua subterránea tiene mucho más valor. La población de la isla ha aumentado en los últimos años y sigue teniendo una tendencia positiva, por lo tanto, la cantidad de agua necesaria para abastecer a toda la población también aumenta.

Cabo Verde se ha adaptado a las condiciones y ha desarrollado sistemas de desalinización del agua para poder utilizarla también como agua potable, siendo así el 70% de la cantidad de agua utilizada.

Geológicamente, la Isla de Santiago está formada por siete eventos geológicos que construyen la isla con sus materiales característicos para cada uno. Estos eventos quedan estructurados en tres unidades principales las cuales forman el acuífero principal de la isla. La unidad base es la más profunda, y se forma principalmente por rocas más impermeables que no permiten que el agua se filtre y por lo tanto hacen de base del acuífero. La unidad media es la encargada de almacenar la mayor parte del agua, que con más grosor en el medio de la isla que en la costa, proporciona más disponibilidad de agua en zonas más altas. Finalmente la unidad reciente es la encargada de proporcionar zonas de recarga.

Gracias a la piezometría, se han podido detallar los niveles de agua durante periodos muy largos de tiempo, analizar la calidad de ésta y ver cuál es el flujo normal de ésta (se ha visto que va de los puntos más altos a los más bajos de la isla, descargándose por la costa hacia el mar). A través de todas estas medidas también, se ha podido detectar que cuando hay una explotación mayor a lo que el acuífero puede asumir, es decir, si se extrae más agua de la

que el acuífero es capaz de rellenar, aparecen problemas de contaminación como el de la intrusión salina. Esto puede llegar a ser un problema muy grave, sobre todo en sitios costaneros de la isla, donde el recurso agua es muy escaso para el nivel de demanda que hay.

Esto también se puede ver reflejado en los análisis hidrogeoquímicos, donde destaca la concentración del sodio. El sodio es un catión que puede estar presente de forma natural en la isla, pero que analizando los resultados y la distribución de éste, se puede ver que su presencia viene relacionada con la intrusión salina, ya que es más abundante en la zona costera. Por parte de aniones, tanto cloruros como sulfatos pueden aparecer en parte también por intrusión salina, pero en este caso destacamos los nitratos, los cuales no aparecerían de forma natural en la isla, sino que son consecuencia directa de contaminación por agricultura o incluso consecuencia de las pobres infraestructuras de gestión de aguas residuales.

Por lo tanto, cabría destacar que la Isla de Santiago necesitaría una inversión para hacer frente a los problemas de aguas residuales y a partir de aquí conseguir mejoras para abastecer a la población y que todos pudieran tener el agua necesaria, ya que muchas veces esto no es una realidad. Si se puede reconducir la problemática, eso también será de gran ayuda a la hora de preservar y mantener el acuífero en buenas condiciones para que siga sirviendo de fuente de agua principal.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Aly de Pina, A. P. S. (2011). *Fundamentos hidrogeoquímicos aplicados na bacia hidrográfica de Santa Cruz, ilha de Santiago - Cabo Verde, como instrumento para a gestão de recursos hídricos*. Universidade Federal do Ceará.
- Bebiano, J. B. (1932). *A geologia do Arquipélago de Cabo verde*. Lisboa: Serviços geológicos de Portugal. 257. Volum 18 de Comunicações dos Serviços geológicos de Portugal.
- da Mota Gomes, A. (1980). A Hidrogeologia de Santiago, Praia.
- da Mota Gomes, A. (2005). Qualidade de Água Subterrânea na Ilha de Santiago.
- da Mota Gomes, A. (2007). *Hidrogeologia e recursos hídricos da Ilha de Santiago (Cabo Verde)*. Universidade de Aveiro. Departamento de Geociências. 298
- da Mota Gomes, A., & Lobo de Pina, A. (2003). Problemas de recursos hídricos em ilhas. Exemplo da ilha de Santiago. In *6º SILUSBA – Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa*.
- Lobo de Pina, A. F. (2009). *Hidroquímica e qualidade das águas subterrâneas da ilha de Santiago - Cabo Verde*. Universidade de Aveiro.
- Losada Lima, A. (1987). Algunas consideraciones sobre la brioflora macaronésica. *Lazaroa*. <https://doi.org/10.5209/LAZAROA.11309>
- Macdonald, M. (1992). *Banco Mundial Programa das Nações Unies. Avaliacao Hydrologica da Africa Sul-Saariana Parses da Africa d'Oeste. Relatório de pais: CABO VERDE*.
- Martel, G., Baltasar, R., & Suárez, P. (2011). *Apoyo a la planificación de los sectores de la energía y el agua para el desarrollo sostenible de Cabo Verde. Proyecto de PECAVE agua*. Canarias.

Peace Corps. (2009). *The Peace Corps Welcomes You to Cape Verde*.

Pim, J., Peirce, C., Watts, A. B., Grevemeyer, I., & Krabbenhoeft, A. (2008). Crustal structure and origin of the Cape Verde Rise. *Earth and Planetary Science Letters*. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.05.012>

Proença de Oliveira, R., Nascimento, J., & Simões, J. (2017). *Balanço hidrológico e estimativas da disponibilidade de água. Ilha de Santiago*.

Santamarta, J. C., Rodríguez-Martín, J., Victória, S. M. D. M. S., Monteiro, S. M. L., & Gutiérrez, L. E. H. (2017). Infraestructuras hidráulicas y recursos hídricos de Cabo Verde. *InGEOpress*, 236 (January 2018), 36–38.

Serralheiro, A. (1976). *A geologia da Ilha de Santiago (Cabo Verde)*. Universidade de Lisboa.

Vinnik, L., Silveira, G., Kiselev, S., Farra, V., Weber, M., & Stutzmann, E. (2012). Cape Verde hotspot from the upper crust to the top of the lower mantle. *Earth and Planetary Science Letters*. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.12.017>